

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



# **Implementação de um sistema Óptico e Optomecânico para um instrumento astronómico baseado no Compressed Sensing**

**Mestrado Integrado em Engenharia Física**

Joana Isabel Gaivota Pires

Dissertação orientada por:

Prof. Dr. André Moitinho de Almeida  
Dr. Alberto Krone-Martins

2016



## Agradecimentos

Em primeiro lugar quero deixar o meu agradecimento ao Prof. Dr. André Moitinho de Almeida por me ter dado a oportunidade de lidar com um conceito completamente inovador, e por me ter mostrado que a investigação é muito mais do que aquilo que nos ensinam nos primeiros anos da faculdade. Em segundo lugar, quero agradecer ao Dr. Alberto Krone-Martins por ter estado sempre disponível para debater tópicos das mais diversas vertentes e por me ter ajudado a pensar fora da caixa. É um investigador nato que realmente dá tudo de si em prol da investigação em astronomia.

Não posso deixar de agradecer aos meus colegas de laboratório, Hélder Savietto, Carlos Barata e Márcia Barros por todo o apoio que me deram nestes últimos meses, aos meus amigos Catarina Cavique, Pedro Carvalho, Ricardo Sousa, Stefan Postolache e Ana Lopes que me acompanharam desde o início desta jornada, e em especial ao Luís Branco que me ajudou na revisão do texto.

Por último, deixo um agradecimento geral a todos os professores e amigos com que me cruzei e me inspiraram a querer fazer mais e melhor.



Para a minha avó, o meu pai e a minha mãe.



## Resumo

Recentemente surgiu uma nova teoria de amostragem de sinais denominada por *Compressed Sensing* (CS). Esta teoria afirma que um sinal esparso pode ser adquirido e reconstruído a partir de medições não adaptativas sem que seja necessário medir o sinal por inteiro. Isto é possível porque muitos dos sinais existentes na natureza são esparsos, em outras palavras, são sinais que, numa determinada base, podem ser representados pela composição de vetores cujos coeficientes são maioritariamente nulos. Uma das primeiras aplicações desta teoria, surgiu em 2009, com o desenvolvimento de um protótipo de uma *Single-Pixel Camera* (SPC), cuja arquitetura incorpora um Dispositivo digital de micro-espelhos (DMD) que cria máscaras especialmente adotadas para uma amostragem que possibilita o CS. Como esta câmara possui apenas um detetor, ela pode ser adaptada para adquirir imagens em comprimentos de onda que os tradicionais *Charge-Coupled Devices* (CCDs) ou os *Complementary Metal-Oxide Semiconductor* (CMOS) não conseguem, conduzindo também a uma possível nova geração de câmaras de alta resolução capazes de captar imagens hiperespectrais. Para além desta vantagem, este conceito também possibilitará reduzir o tamanho e o peso dos equipamentos, o que pode ser crítico para utilização no espaço.

O presente trabalho teve como objetivos a realização do design e da implementação de um sistema ótico e optomecânico direcionado para uma SPC para utilização num telescópio, e ainda trazer para o grupo de investigação CENTRA/SIM novos conhecimentos sobre técnicas de impressão 3D. Para tal, numa primeira fase, foram realizadas simulações óticas no programa ZEMAX para definir quais as características dos componentes óticos a adotar neste protótipo. A fase seguinte consistiu em utilizar o programa SolidWorks para elaborar os desenhos técnicos dos componentes optomecânicos necessários ao sistema, que por sua vez, foram produzidos no laboratório utilizando técnicas de impressão 3D como a *Fused Deposition Modeling* (FDM) e a *Stereolithography* (SLA). Ao longo da produção dos componentes adquiriram-se conhecimentos sobre as propriedades térmicas e mecânicas de materiais termoplásticos, como o *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) e o *Polylactic Acid* (PLA), e de resinas *standard*.

**Palavras-Chave:** Aquisição Comprimida, Astronomia, Design Óptico, Design Opto-mecânico, Técnicas de Impressão 3D





# Abstract

Recently, a new signal sampling theory, named Compressed Sensing (CS), has emerged. This theory states that a sparse signal can be acquired and reconstructed from non-adaptive measurements by taking far fewer measurements than in classical approaches. This is possible because many natural signals are sparse or compressible in some appropriate basis. This means they can be represented as compositions of vectors where most of coefficients are zero. One of the first applications of this theory appeared in 2009, with the development of a Single-Pixel Camera (SPC) prototype, whose architecture incorporates a Digital Micromirror Device (DMD) capable of generating random sampling patterns that yields the CS. As this camera only has one detector, it can be adapted to acquire images at wavelengths that are currently impossible with conventional Charge-Coupled Devices (CCDs) and Complementary Metal- Oxide Semiconductor (CMOS), or very expensive, leading us to a new generation of high resolution cameras capable of acquiring hyperspectral images. In addition to this advantage, this concept will also allow minimize the size and weight of the equipment, which may be critical in space.

The present master's dissertation aims at designing and implementing the optical and optomechanical systems of a SPC that could be coupled in a telescope, and also, bring to the CENTRA/SIM investigation group, extended know how with respect to 3D printing techniques. The first phase relied on ZEMAX optical simulations to choose the characteristics of the optical components adopted in this prototype. In a next phase we elaborated technical drawings of optomechanical components using the SolidWorks program, which were produced in laboratory facilities with Fused Deposition Modeling (FDM) and Stereolithography (SLA) techniques. Throughout the production of the components, we acquired a deeper knowledge of the mechanical and thermal properties of thermoplastic materials such as Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and Polylactic Acid (PLA), as well as of standard resins.

**Keywords:** Astronomy, Compressed Sensing, Optical design, Optomechanical design, 3D printer techniques.



# Índice

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	vi
Abstract .....	viii
Lista de figuras .....	xii
Lista de tabelas .....	xvi
Lista de abreviaturas .....	xviii
1. Introdução .....	1
1.1 Estado da Arte .....	1
1.2 Objetivos .....	2
2. Compressed Sensing .....	3
2.1 Contexto .....	3
2.2 Aquisição de sinais.....	3
2.3 Reconstrução de sinais .....	4
2.4 Single Pixel Camera .....	4
3. Projeção do sistema ótico .....	6
3.1 Componentes óticos .....	6
3.1.1 DMD .....	6
3.1.2 Fotodíodo .....	7
3.1.3 Lentes .....	8
3.2 Requisitos do sistema .....	8
3.3 Simulações no ZEMAX .....	9
3.4 Análise do sistema.....	13
4. Projeção dos componentes optomecânicos .....	15
4.1 Modelação em CAD.....	15
4.2 Análise e desenvolvimento de suportes.....	16
5. Impressão 3D .....	20
5.1 Contexto .....	20
5.2 Técnica FDM .....	21
5.2.1 Materiais.....	21

5.2.2	Problemas de impressão .....	22
5.3	Técnica SLA.....	23
5.3.1	Materiais.....	24
5.3.2	Problemas de impressão .....	24
5.4	Características de impressão e custo das peças .....	25
5.5	Ultimaker 2 vs Form 1+ .....	28
6.	Análise e acabamento das peças.....	29
6.1	Pós-Impressão .....	29
6.2	Tolerâncias .....	31
6.3	Suportes finais .....	32
7.	Conclusão .....	34
Apêndice A – Desenhos técnicos .....		35
Apêndice B – Medições .....		52
Apêndice C – Imagens .....		57
Referências .....		60

# Lista de figuras

Figura 1.1 - Diagrama de blocos que ilustra a distribuição do trabalho em três áreas distintas. Os blocos azuis referem-se ao sistema ótico, os blocos verdes referem-se à eletrônica, o bloco cinzento ao processamento por software da reconstrução de sinal, e para completar, o laranja indica o sinal de entrada. Este trabalho versa principalmente sobre os blocos azuis. ....	2
Figura 2.1 - Esquema matricial da aquisição do sinal no sensor utilizando uma matriz de medida $\Phi$ e a matriz $\Psi$ que leva à esparsidade. (Imagem adaptada de [7]) .....	4
Figura 2.2 - Esquema de uma SPC. Quando um feixe de luz incide no DMD, forma-se um padrão semi-aleatório de luz, que é então direcionado para o fotodíodo. O sinal recebido corresponde a uma medição $y_m$ , que será transformada num valor de tensão [2]......	5
Figura 3.1 - a) Posições "on" e "off" dos microespelhos. O estado "on" reflete a luz para uma lente, o que corresponde a um pixel de luz na imagem. O estado "off" reflete a luz para o espaço em redor, que por sua vez, corresponde a um pixel escuro na imagem [12]. b) Imagem do dispositivo DMD [11]. ....	7
Figura 3.2 – a) Imagem do fotodíodo Hamamatsu S1223 [14]. b) Gráfico da fotossensibilidade vs Comprimento de onda [15]. ....	7
Figura 3.3 – Menu General onde se introduz o valor da abertura, o seu tipo, e as unidades utilizadas no sistema. ....	10
Figura 3.4 - Menu Wavelength Data onde se define os comprimentos de onda utilizados durante a simulação.....	10
Figura 3.5 - Lens Editor onde se colocam os parâmetros principais das simulações, nomeadamente, o raio das lentes, a distância entre duas superfícies, o material dos componentes, etc. ....	11
Figura 3.6 - 3D Layout do sistema ótico correspondente à Figura 3.5. ....	12
Figura 3.7 - Field Data – Menu onde se introduz o ângulo de entrada da luz que incide na primeira lente. ....	13
Figura 3.8 - Spot Diagram para comprimentos de onda, compreendidos entre o ultravioleta e o infravermelho. Nesta simulação observa-se uma aberração cromática para ângulos de entrada diferentes de zero. ....	14
Figura 3.9 - Spot Diagram para o comprimento de onda do azul. Esta simulação é idêntica à da Figura 3.8 mas sem considerar os restantes comprimentos de onda. ....	14
Figura 4.1 - a) Ambiente gráfico do SolidWorks onde se elaboram os esboços de modelos técnicos. b) Algumas das relações que se podem aplicar entre formas regulares. ....	15
Figura 4.2 – Protótipos, de um suporte de lentes, realizados na fase de testes. ....	16
Figura 4.3 - a) Suporte de fixação. Observa-se que esta peça precisa de ser resistente devido ao aperto dos parafusos. b) Suporte para lentes que não mostrou ter a resistência necessária para o nosso sistema.....	17
Figura 4.4 - Protótipos, de um suporte de lentes, realizados na fase de testes. ....	17
Figura 4.5 - a) Suporte móvel nos eixos X e Y. b) Acoplador que permite a conexão do fotodíodo ao sistema eletrónico. ....	18
Figura 4.6 - Modelo CAD do suporte das lentes e do suporte para o fotodíodo. Ambos são constituídos por um total de 12 peças produzidas em impressoras 3D. ....	19
Figura 4.7 - Modelo CAD do suporte da placa eletrónica onde está inserido o DMD.....	19
Figura 5.1 – a) Efeito Warping. b) Efeito Pillowing. c) Efeito de má extrusão .....	23
Figura 5.2 - a) Mau acabamento devido à escassez de resina no tanque. b) e c) Imagem referente a um suporte que ficou inacabado porque a peça desprendeu dos seus suportes e acabou por tombar no tanque de resina.....	24

Figura 5.3 - Ambiente gráfico do programa Cura (versão 15.04.06).	27
Figura 5.4 - Ambiente gráfico do programa Preform (versão 2.71).	27
Figura 6.1 – a) Conjunto de peças impressas na Ultimaker 2. b) Peça em PLA com suportes. c) Materiais utilizados para alisar as peças.	30
Figura 6.2 – a) Conjunto de peças impressas na Form 1+. b) Diferença no acabamento das peças conforme a orientação em que é impressa. c) Processo de limpeza das peças num reservatório com álcool isopropílico.	30
Figura 6.3 – Redimensionamento do comprimento dos parafusos.	30
Figura 6.4 - Ilustração da peça Base - Eixo X e representação das dimensões apresentadas na Tabela 6.1.	31
Figura 6.5 – a) DMD b) Fotodíodo c) Lente com uma distância focal de 150 mm e um diâmetro de 25,4 mm.	32
Figura 6.6 – Imagem dos componentes óticos acoplados nos respectivos suportes optomecânicos.	33
Figura 6.7 – Esquema ótico final que ilustra a simulação apresentada na Figura 3.6.	33
Figura A. 1 - Desenho técnico da peça Base-Eixo X.	35
Figura A. 2 - Desenho técnico da peça Tampa-Eixo X.	36
Figura A. 3 - Desenho técnico da peça Base-Eixo Y.	37
Figura A. 4 - Desenho técnico da peça Tampa - Eixo Y.	38
Figura A. 5 - Desenho técnico da peça Eixo móvel - X & Y.	39
Figura A. 6 - Desenho técnico da peça Base - Eixo Z.	40
Figura A. 7 - Desenho técnico da peça Suporte Lente - Face 1	41
Figura A. 8 - Desenho técnico da peça Suporte Lente - Face 2	42
Figura A. 9 - Desenho técnico da peça Tampa - Eixo Z	43
Figura A. 10 - Desenho técnico da peça Suporte de fixação	44
Figura A. 11 - Desenho técnico da peça Fotodíodo	45
Figura A. 12 - Desenho técnico da peça Tampa do Fotodíodo	46
Figura A. 13- Desenho técnico da peça Placa	47
Figura A. 14 - Desenho técnico da peça Poste	48
Figura A. 15 - Desenho técnico da peça Suporte inferior para cartão.	49
Figura A. 16 - Desenho técnico da peça Suporte superior para cartão.	50
Figura A. 17 – Desenho técnico da peça Base Eixo Z (Duplo).	51
Figura B. 1 - Ilustração da peça Base - Eixo X e representação das dimensões apresentadas na Tabela B.1.	52
Figura B. 2 - Ilustração da peça Poste e representação das dimensões apresentadas nas tabelas B.2 e B.3.	53
Figura B. 3 - Ilustração da peça Base - Eixo X e representação das dimensões apresentadas na Tabela B.4.	53
Figura B. 4 - Ilustração da parte inferior de um suporte de lentes e representação das dimensões apresentadas na Tabela B.5.	54
Figura B. 5 - Ilustração da parte inferior de um suporte de lentes e representação das dimensões apresentadas na Tabela B.6.	55
Figura B. 6 - Ilustração da peça Base - Eixo Y e representação das dimensões apresentadas na Tabela B.7.	56

Figura C. 1 - a) Obstrução do bico de impressão (nozzle) da impressora Ultimaker 2. B) Limpeza do nozzle. ....	57
Figura C. 2 – a) Substituição de uma ventoinha lateral da cabeça de impressão da Ultimaker 2. b) Aquisição de um novo kit do nozzle. ....	57
Figura C. 3 - a) Motor de passo que empurra o filamento de plástico na Ultimaker 2. b) Desgaste do filamento de plástico. ....	57
Figura C. 4 - a) Efeito dos suportes de PLA na zona da calha. b) Efeito de uma baixa densidade de preenchimento dos suportes produzidos em PLA. ....	58
Figura C. 5 - a) Efeito dos suportes e dos resíduos extra de resina. b) Peça fabricada em resina que quebrou. ....	58
Figura C. 6 – a) Suporte inferior e superior para cartões. b) Lente de 25,4 mm de diâmetro. ....	58
Figura C. 7 - a) Substituição do sensor de temperatura da Ultimaker 2. b) Bolha de nível utilizada para nivelar o suporte do DMD. ....	59
Figura C. 8 - a) Impressora Form 1+. b) Impressora Ultimaker 2+ com tampa produzida no laboratório. ....	59





## Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Distância focal em mm das lentes existentes nas lojas Thorlabs e Eksma Optics ....	9
Tabela 3.2 - Características das lentes utilizadas neste projeto.....	11
Tabela 5.1 – Dados estatísticos sobre as peças constituintes dos suportes optomecânicos fabricados em termoplásticos tendo por base o valor de 33 €/ 750g de PLA [54]:.....	25
Tabela 5.2 - Dados estatísticos sobre as peças constituintes dos suportes optomecânicos fabricados em resina preta tendo por base o valor de 162 €/Litro [49]:.....	26
Tabela 5.3 – Vantagens e desvantagens da impressora Ultimaker 2.....	28
Tabela 5.4 – Vantagens e desvantagens da impressora Form 1+ .....	28
Tabela 6.1 - Comparação entre o valor teórico e o valor medido da peça Base - Eixo X produzida em resina standard.....	31
Tabela 6.2 - Comparação entre o valor teórico e o valor medido da peça Base – Eixo X produzida em PLA. ....	32

Tabela B. 1 - Tabela com os valores teóricos e valores medidos para a peça Base - Eixo X produzida com resina standard.....	52
Tabela B. 2 - Tabela com os valores teóricos e valores medidos para a peça Poste nº1 produzida com resina standard.....	53
Tabela B. 3 - Tabela com os valores teóricos e valores medidos para a peça Poste nº2 produzida com resina standard.....	53
Tabela B. 4 - Tabela com os valores teóricos e valores medidos para a peça Base – Eixo X produzido com PLA. ....	54
Tabela B. 5 - Tabela com os valores teóricos e valores medidos da parte inferior de um suporte de lentes produzido com ABS.....	54
Tabela B. 6 - Tabela com os valores teóricos e valores medidos para a peça Placa do DMD produzida com resina standard.....	55
Tabela B. 7 - Tabela com os valores teóricos e valores medidos para a peça Base – Eixo Y produzido com PLA. ....	56



## **Lista de abreviaturas**

ABS - Acrylonitrile Butadiene Styrene

CAD – Computer Aided Design

CCD – Charge-Coupled Device

CMOS – Complementary Metal-Oxide Semiconductor

CS – Compressed Sensing

DLP – Digital Light Processing

DMD – Digital Micromirror Device

EBM – Electronic Beam Melting

FDM – Fused Deposition Modeling

IFU – Integral Field Units

LOM – Laminated Object Manufacturing

PLA – Polylactic Acid

SLA – Stereolithography

SLM – Selective Laser Melting

SLS – Selective Laser Sintering

SPC – Single-Pixel Camera



# Capítulo 1

## *Introdução*

### 1.1 Estado da Arte

O mistério da astronomia provém desde o início da humanidade em que as civilizações antigas utilizavam a posição das estrelas para determinar as horas, a época da colheita, ou mesmo para se orientarem no mar. E tal como os antigos navegadores se lançavam ao mar em busca de novos continentes, hoje, os engenheiros e os astrónomos unem forças para desenvolver instrumentos que nos permitam explorar o Universo.

Atualmente, as imagens astronómicas são normalmente captadas através de câmaras que contêm *arrays* de *Charge-Coupled Devices* (CCDs), ou com base em *Complementary Metal-Oxide Semiconductor* (CMOS), que captam comprimentos de onda na gama do visível, infravermelho (IR) e ultravioleta (UV). Porém, entrámos numa era, em que o tamanho dos *arrays* dos CCDs tem vindo a crescer devido à necessidade de adquirir novos dados em períodos de tempo cada vez mais pequenos e com taxas de compressão muito elevadas. Para se ter uma noção, o satélite da missão Gaia possui uma câmara de aproximadamente um bilião de pixéis ( $10^9$  pixéis) que é formada por um total de 106 CCDs, em que cada um possui 8 milhões de pixéis. Um outro exemplo é o da maior imagem captada pelo Hubble (imagem da galáxia Andrómeda), que possui uma resolução de 1,5 biliões de pixéis e ocupa 4,3Gb de armazenamento [1].

Um dos desafios que a instrumentação astronómica enfrenta centra-se na capacidade de processamento, armazenamento e transmissão de dados. Uma forma de solucionar este problema encontra-se numa teoria matemática desenvolvida em 2006 por Candès, Romberg e Tao, intitulada de *Compressed Sensing* (CS). Esta teoria afirma que um sinal esparsa pode ser adquirido e comprimido através de um número de medições inferior ao estipulado pelo teorema de amostragem de Shannon-Nyquist. No mundo do CS a resolução de uma imagem é controlada pela informação contida na mesma, isto é, pelos coeficientes (Fourier, Wavelets, etc) mais relevantes para o sinal [2]. O que é equivalente a dizer que um sinal (e.g. imagem) pode ser obtida a partir de menos medições sem que ocorra perda de informação. Posteriormente o sinal pode ser reconstruído através de algoritmos baseados em técnicas de otimização.

Para testar esta teoria, os investigadores Richard Baraniuk e Kevin Kelly da Universidade de Rice, criaram em 2009, o primeiro protótipo de uma *Single-Pixel Camera* (SPC) [2]. A diferença entre esta câmara e as tradicionais é que no lugar do CCD, esta câmara possui um *Digital Micromirror Device* (DMD) que produz um conjunto de padrões de luz aleatórios que são depois direcionados para um fotodíodo. Estes testes foram efetuados com luz visível, e em especial em regiões do espectro que não possuem detetores com alta resolução espacial (e.g. IR médio, IR distante) ou no qual detetores são relativamente dispendiosos (e.g. IR próximo), e também para dados multi-espectrais que atualmente exigem detetores muito complexos (e.g. *Integral Field Units* (IFUs) [3]).

## 1.2 Objetivos

A investigação na área do CS pode vir a permitir a aquisição de uma maior quantidade de dados astronômicos em tempos mais reduzidos, com menos recursos físicos do que os instrumentos atuais e, principalmente, de adquirir informação em comprimentos de onda nos quais ainda não temos uma boa resolução espacial, ou em que os detetores de imagem podem ser extremamente dispendiosos, como o IR médio e distante. Deste modo, esta dissertação está incorporada num projeto que tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de uma SPC direcionado especificamente para a astronomia. Neste caso pretende-se que a câmara possa ser acoplada em telescópios de pequeno porte e que possua uma abertura angular de  $0,5^\circ$  [4], para que seja possível fazer a aquisição da imagem da lua.

O projeto inicial está subdividido em três áreas distintas que podem ser desenvolvidas em simultâneo: 1) Desenvolvimento de algoritmos para a restauração do sinal, 2) Desenvolvimento da eletrônica que controla o sistema, e 3) Desenvolvimento do sistema ótico e optomecânico. Esta dissertação aborda a última área referida, isto é, o desenvolvimento do sistema ótico e optomecânico. Para tal, numa primeira fase, realizaram-se simulações óticas no programa ZEMAX para determinar quais os componentes óticos mais apropriados a implementar no protótipo. As características das lentes óticas foram escolhidas tendo em conta o *stock* existente nos fornecedores mais comuns como a Thorlabs, Edmund Optics ou Eksma Optics. Posteriormente, com recurso ao programa de desenho técnico, SolidWorks, elaborou-se modelos CAD em 3D para os suportes das lentes, do DMD e do fotodíodo.

Por último, utilizaram-se impressoras 3D que funcionam com base nas técnicas *Fused Deposition Modeling* (FDM) e *Stereolithography* (SLA), para produzir os protótipos impressos das peças desenhadas no SolidWorks. Isto serviu para trazer mais conhecimento sobre técnicas de impressão 3D para o grupo de investigação Centro Multidisciplinar de Astrofísica/Modelação e Instrumentação para o Espaço (CENTRA/SIM), e para alinhar o trabalho com processos de produção modernos que têm sido cada vez mais adotados na indústria moderna, em especial na indústria aeroespacial.

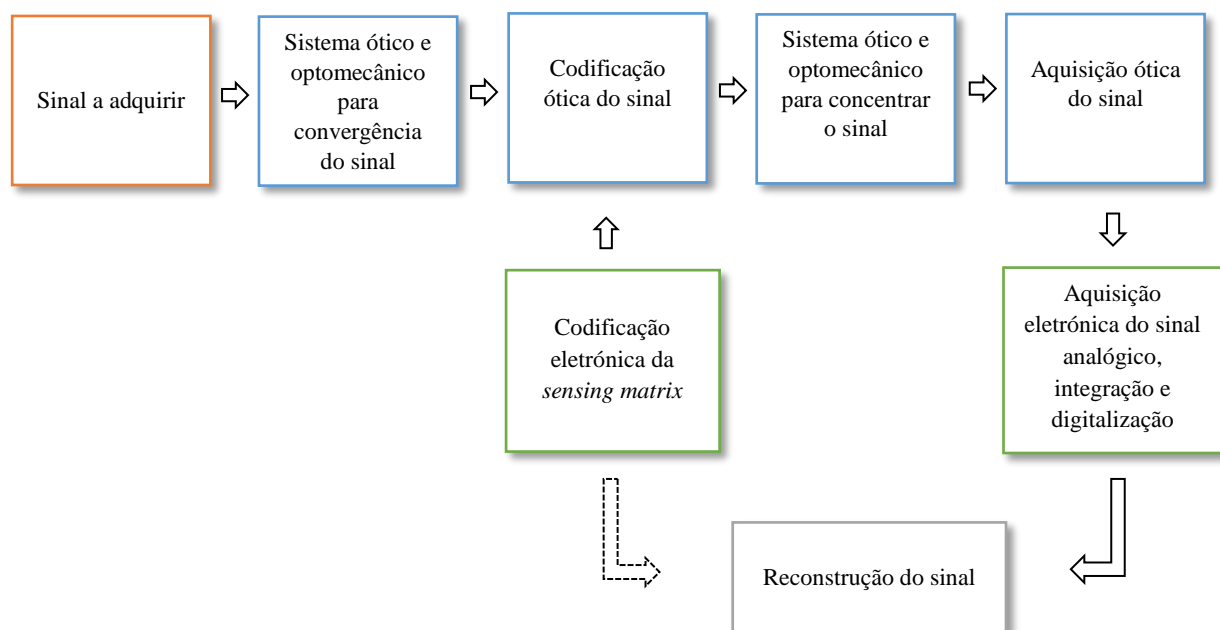


Figura 1.1 - Diagrama de blocos que ilustra a distribuição do trabalho em três áreas distintas. Os blocos azuis referem-se ao sistema ótico, os blocos verdes referem-se à eletrônica, o bloco cinzento ao processamento por software da reconstrução de sinal, e para completar, o laranja indica o sinal de entrada. Este trabalho versa principalmente sobre os blocos azuis.

# Capítulo 2

## *Compressed Sensing*

### 2.1 Contexto

Para entender o CS é necessário ter em conta o conceito de amostragem. A amostragem de um sinal é o processo em que passamos de um sinal analógico (representado por uma onda) para um sinal digital (representado por um conjunto discreto de números). Convencionalmente, a amostragem de sinais segue o princípio da amostragem de Shannon-Nyquist, que afirma que, para reconstruir um sinal, é necessário que a frequência de amostragem seja, no mínimo, igual ao dobro da frequência máxima contida no mesmo. Caso contrário, produz-se um fenómeno indesejável, denominado de *aliasing*, que se traduz numa sobreposição do espectro e inviabiliza a recuperação do sinal [5]. O que o CS vem trazer de novo é que ele aproveita o facto de a maioria dos sinais existentes na natureza possuírem uma representação esparsa numa determinada base, para reconstruir uma imagem tendo por base um número de medições inferior à exigida pelo teorema de Shannon-Nyquist. Isto é possível porque a maior parte da informação dos sinais está contida em poucos coeficientes do sinal.

### 2.2 Aquisição de sinais

Uma imagem, ou um sinal discreto no tempo, é retratada no espaço  $\mathcal{R}^N$  por uma base de  $N \times 1$  vetores unidimensionais,  $\{\psi_i\}_{i=1}^N$ , que pode ser considerada como sendo ortogonal. Estes vetores assumem-se como sendo esparsos pois possuem poucos coeficientes  $K$  (com  $K < N$ ), cujo valor seja relevante para a reconstrução final do sinal. Ao formar uma matriz de bases de vetores  $N \times N$ ,  $\psi := [\psi_1][\psi_2] \dots [\psi_N]$ , cujas colunas são representadas por  $\{\psi_i\}$ , torna-se possível expressar um sinal  $x$  como sendo,

$$x = \sum_{i=1}^N s_i \cdot \psi_i \quad \text{ou} \quad x = \overrightarrow{\psi} \cdot \vec{s} \quad (2.1)$$

Onde  $s$  é um vetor coluna  $N \times 1$  que representa os coeficientes diferentes de zero, do sinal, e é dado por:

$$s = \langle x, \psi_i \rangle = \psi_i^T \cdot x \quad (2.2)$$

Em que  $\psi^T$  corresponde à matriz transposta de  $\psi$  [6].

O processo de aquisição de sinal consiste em medir  $M < N$  funções lineares, que são representadas pelo produto interno entre o sinal inicial  $x$  e as diferentes funções que foram medidas pelo sensor,  $\phi_m$ :

$$y_1 = \langle x, \phi_1 \rangle \quad , \quad y_2 = \langle x, \phi_2 \rangle \quad , \quad \dots \quad , \quad y_m = \langle x, \phi_m \rangle \quad (2.3)$$

Onde  $m = 1, \dots, M$  é o número total de medições.

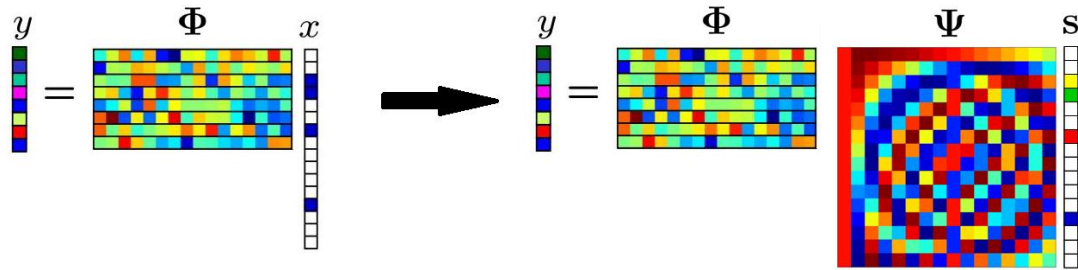


Figura 2.1 - Esquema matricial da aquisição do sinal no sensor utilizando uma matriz de medida  $\Phi$  e a matriz  $\Psi$  que leva à esparsidade. (Imagem adaptada de [7])

## 2.3 Reconstrução de sinais

O desafio da reconstrução do sinal está na forma de resolver o sistema  $y_m = \Phi_m x$  sem conhecer previamente quais os  $K$  de  $x$  que não são nulos através de tentativa e erro [8]. Como este processo é muito demoroso até encontrar uma solução única para este problema, Candès e Tao, ao tornarem o processo de medição como não-adaptativo, conseguiram encontrar um atalho que permite reconstruir uma imagem de forma eficaz. O método utilizado chama-se Minimização L1 e assume que o valor de  $M$  tem uma dependência logarítmica em  $N$ .

$$M \propto K \log\left(\frac{N}{K}\right) \quad (2.4)$$

Para além disso, também é necessário saber o tipo de base em que a imagem é esparsa (Fourier, Wavelets, etc). Por exemplo, caso seja numa base de Wavelets, a base de medição deve ser do tipo complementar, isto é, numa base Noiselets.

Apesar dos avanços, os testes com algoritmos de reconstrução ainda estão em fase de desenvolvimento e desde então já surgiram novos métodos: *Orthogonal Matching Pursuit* (OMP), *Regularized OMP* (ROMP) e *Stagewise OPM* (StOMP). Estes dois últimos combinam a velocidade do método OMP com a eficácia do método L1. [2]

## 2.4 Single Pixel Camera

Em 2009, para testar esta teoria, Richard Baraniuk e Kevin Kelly da Universidade de Rice, criaram o primeiro protótipo de uma SPC (câmara de um só pixel). O segredo desta câmara consiste em substituir o tradicional CCD por um DMD e um único fotodíodo. Um DMD é um dispositivo ótico (MOEMS) constituído por uma matriz de  $N$  micro-espelhos individuais, que podem estar direcionados em duas posições angulares diferentes,  $\pm\theta$ . Esta característica permite adquirir um número de medições aleatórias inferior ao número total de pixels da imagem e acelerar o tempo de aquisição de imagem.



Ao longo do tempo de aquisição da imagem, as posições dos espelhos do DMD vão variando, produzindo um conjunto de padrões de luz caracterizados por diferentes combinações lineares de  $y_m = \Phi_m x$ . Para obter a matriz  $\Phi_m$ , é necessário saber a posição efetiva dos espelhos, que são controladas eletronicamente utilizando um gerador de números aleatórios, que tem em conta o número de medições pretendidas pelo utilizador [9,10,11]. Com este método é possível obter uma correlação entre os padrões da amostra e as flutuações de luz registadas.

De forma geral, a sua arquitetura é constituída por um conjunto de lentes, um DMD, um fotodíodo, um sistema eletrónico que controla os espelhos do DMD, e um outro onde está inserido um conversor analógico-digital que permite converter o sinal recebido no fotodíodo, num sinal digital (Figura 2.2).

A principal vantagem da SPC é que esta câmara pode ser adaptada para comprimentos de onda onde é difícil, ou dispendioso, criar grandes *arrays* de sensores.

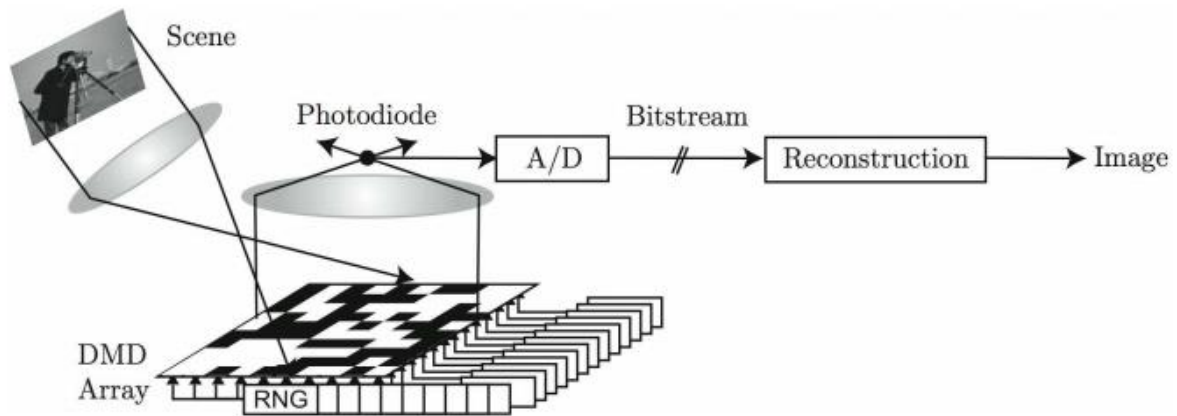


Figura 2.2 - Esquema de uma SPC. Quando um feixe de luz incide no DMD, forma-se um padrão semi-aleatório de luz, que é então direcionado para o fotodíodo. O sinal recebido corresponde a uma medição  $y_m$ , que será transformada num valor de tensão [2].

# Capítulo 3

## *Projeção do sistema ótico*

### 3.1 Componentes óticos

Este capítulo tem como finalidade identificar quais as características principais dos componentes óticos necessários para construir um protótipo de uma SPC e efetuar o *procurement* das mesmas, ou seja, determinar fornecedores, identificar os componentes necessários, analisar características, comparar custos, escolher o fornecedor final e efetuar a aquisição do material.

#### 3.1.1 DMD

O modulador ótico utilizado neste sistema encontra-se acoplado ao circuito eletrônico DLP 3000 Light Crafter, que pode ser utilizado em projetores de imagem e vídeo. Este modulador é uma combinação entre elementos optomecânicos e eletromecânicos, que permitem modificar a configuração dos microespelhos com uma taxa de milhares de vezes por segundo, permitindo a formação dos diferentes padrões de luz necessários para a codificação de uma imagem [11]. A inclinação de cada espelho do DMD pode variar entre  $\pm 12^\circ$  e é regulada através de impulsos binários enviados ao chip que está ligado a cada microespelho (Figura 3.1 a). A preferência por este DMD está relacionada com a área ativa dos espelhos.

Características principais do DMD:

- Possui um array de alumínio com dimensões de  $608 \times 684$  (Colunas  $\times$  Linhas), cuja diagonal possui 7,62 mm;
- Cada microespelho tem a largura de  $7,637 \mu\text{m}$  e uma diagonal de  $10,8 \mu\text{m}$ ;
- Cada espelho pode ter um ângulo (*tilt*) de  $+12^\circ$  ou  $-12^\circ$ , em relação à posição horizontal;
- Funciona para comprimentos de onda de 420 nm a 700 nm;
- Cada microespelho tem uma refletividade de 88%;
- O array tem uma eficiência de difração de 86%;
- Trabalha numa gama de temperaturas entre  $-10^\circ\text{C}$  e  $70^\circ\text{C}$ ;
- A área ativa do DMD é de 3,699 mm de largura por 6,572 mm de comprimento;
- Tem um consumo médio de 200 mW;
- Tem uma taxa de *input* de 60 MHz a 80 MHz.

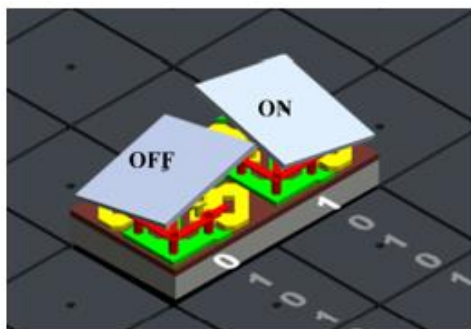


Figura 3.1 - a) Posições "on" e "off" dos microespelhos. O estado "on" reflete a luz para uma lente, o que corresponde a um *pixel* de luz na imagem. O estado "off" reflete a luz para o espaço em redor, que por sua vez, corresponde a um pixel escuro na imagem [12]. b) Imagem do dispositivo DMD [11].

### 3.1.2 Fotodíodo

Em termos de ótica, o protótipo que se desenvolveu requer que o detetor de fótons seja sensível aos comprimentos de onda na banda da luz visível (380 nm a 750 nm). De acordo com a oferta de mercado, e com o requisito apresentado, estipulou-se que o fotodíodo a ser utilizado seria o Hamamatsu S1223. Este fotodíodo tem as mesmas características que o fotodíodo utilizado na SPC que Rice desenvolveu. [13].

Características principais do fotodíodo:

- Sensibilidade a comprimentos de onda na região do visível e infravermelho (320 nm a 1100 nm), cujo pico de sensibilidade ocorre nos 960 nm.
- Possui um sensor fotossensível de dimensões 2,4mm × 2,8mm;
- A área total de sensibilidade é de 2,6 mm<sup>2</sup>;
- Opera numa gama de temperaturas entre -40 °C e +100 °C;
- Tem uma potência de dissipação de 100 mW.

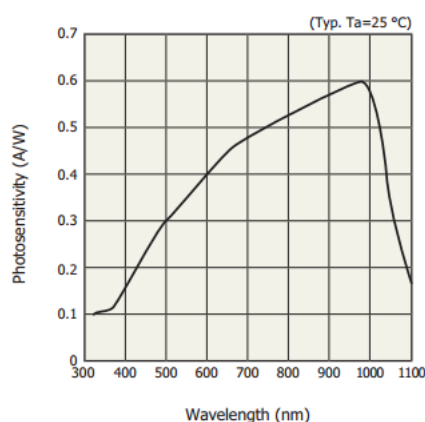
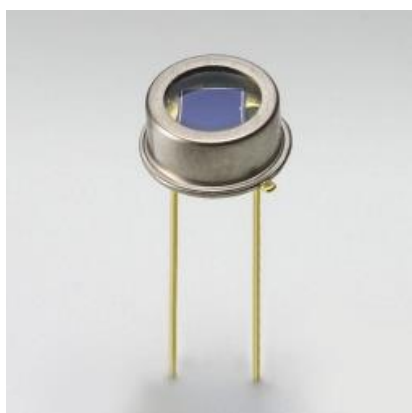


Figura 3.2 – a) Imagem do fotodíodo Hamamatsu S1223 [14]. b) Gráfico da fotossensibilidade vs Comprimento de onda [15].

### 3.1.3 Lentes

De forma a simplificar o estudo deste sistema, dividiu-se o percurso ótico, da Figura 2.2, em dois caminhos distintos. O primeiro caminho consiste em fazer convergir uma imagem, que está no infinito, no *array* de microespelhos. Como os raios que provêm do infinito estão todos paralelos entre si, é necessário colocar uma lente convergente, para que os raios sejam refratados e converjam num único ponto, que neste caso é o DMD. Assim definiu-se que a lente colocada entre a imagem e o DMD seria uma lente biconvexa. Por sua vez, os raios que surgem do DMD estão dispersos entre si e é preciso manipulá-los de forma a que converjam para o fotodíodo. Este segundo trajeto pode ser formado por conjuntos distintos de lentes mas, após alguns testes primordiais no ZEMAX, observou-se que a melhor maneira de diminuir o percurso ótico, e de evitar aberrações monocromáticas e cromáticas, seria a de colocar uma outra lente biconvexa entre o DMD e o fotodíodo. Esta lente coleta os raios e torna-os paralelos entre si, por isso, para os tornar novamente convergentes, é necessário uma outra lente biconvexa. Deste modo o sistema total é constituído por 3 lentes.

O diâmetro das lentes foi delimitado a 2,54 cm (1 polegada), pois é o tamanho usual das oculares utilizadas nos telescópios. A implementação de lentes com um diâmetro superior só contribuiria para o aumento dos componentes optomecânicos e possíveis custos económicos.

As restantes características das lentes (distância focal, espessura central, e espessura da extremidade), foram definidas com base em simulações óticas, descritas na próxima secção, e nos catálogos disponíveis pelos fornecedores usuais de lentes: Thorlabs, Edmund Optics e Eksma Optics.

## 3.2 Requisitos do sistema

Informações iniciais:

- A imagem projetada no DMD tem de estar bem focada e não pode ultrapassar os 3,699 mm porque é a altura máxima da zona ativa;
- A imagem projetada no fotodíodo não precisa de estar focada e deve ter um tamanho máximo de 2,4 mm;
- O diâmetro das lentes é de 25,4 mm (1 polegada);

Informações a determinar:

- Distância entre o objeto e a lente L1;
- Distância entre a lente L1 e o DMD;
- Distância entre o DMD e a lente L2;
- Distância entre as lentes L2 e L3;
- Distância entre a lente L3 e o fotodíodo;
- Distância focal, espessura central (CT), espessura da extremidade (ET), e raio de curvatura das três lentes;

### 3.3 Simulações no ZEMAX

Para realizar as simulações óticas, utilizou-se o programa de simulação ótica ZEMAX (versão Junho de 2009) que serve para modelar, analisar e auxiliar em projetos de sistemas óticos, sejam eles refrativos, refletivos ou difrativos. Um projeto pode ser abordado de três modos diferentes: modo sequencial, modo não sequencial e modo híbrido (sequencial e não sequencial). O sistema estudado neste trabalho foi planejado no modo sequencial pois os raios de luz seguem de forma ordenada para cada superfície. Caso contrário, se os raios fossem da superfície 1 para a superfície 6, e de seguida para a superfície 2, teríamos então um modo não sequencial. O modo híbrido é particularmente utilizado quando se adicionam componentes especiais, como os prismas [16].

Antes de iniciar uma simulação é importante especificar algumas características como o comprimento de onda, o diâmetro da pupila, as unidades do sistema e o tipo de vidro das lentes. Na barra de ferramentas encontra-se o menu *General* com vários separadores que se podem personalizar. Neste caso particular, especificou-se que a abertura do sistema seria o diâmetro da pupila e que o valor de abertura seria de 12,7 mm. Este valor corresponde a metade do valor do diâmetro das lentes porque, como se verá mais adiante, o ZEMAX coloca as dimensões tendo em conta a simetria do eixo horizontal, ou seja, o diâmetro vai de  $-12,7$  mm a  $+12,7$  mm, o equivalente aos 25,4 mm (Figura 3.3). As unidades definidas foram o milímetro e o grau. De seguida, introduziu-se, no menu *Wavelength Data*, a gama de comprimentos de onda pretendidos (radiação visível). Por norma o ZEMAX faz as simulações com  $\lambda = 587$  nm, no entanto, é preferível introduzir o valor mínimo e máximo de  $\lambda$  para que as simulações tenham em conta a dispersão de cada comprimento de onda (Figura 3.4). Este parâmetro vai ser importante no estudo do *Spot Diagram*.

Após realizado um levantamento de informação sobre as lentes existentes no mercado, verificou-se que a Thorlabs tem uma gama de oferta em que a distância focal de uma lente varia entre 25,4 mm e 1000 mm, a Edmund Optics tem uma gama entre 30,0 mm e 750 mm, e a Eksma Optics entre 25,0 mm e 1000 mm.

Em termos de custo, a Edmund Optics mostrou ser o fornecedor cujo preço é mais avultado e, simultaneamente, o fornecedor com menor oferta. Neste último campo a Thorlabs disponibiliza uma maior variedade de distâncias focais (Tabela 3.1). O único senão da Thorlabs é que possui um custo de portes e de tempo de envio, superiores à Eksma Optics, que tem sede na Lituânia. Após algumas simulações, verificou-se que a variação entre as distâncias focais oferecidas por estes dois últimos fornecedores não compromete a projeção deste sistema ótico. Logo, optou-se por fazer as simulações finais com base na espessura das lentes existentes no catálogo da Eksma Optics.

Tabela 3.1 - Distância focal em mm das lentes existentes nas lojas Thorlabs e Eksma Optics

Thorlabs	Eksma Optics	Thorlabs	Eksma Optics	Thorlabs	Eksma Optics
25,4	25,0	100,0	100,0	400,0	-----
30,0	30,0	125,0	-----	500,0	500,0
35,0	-----	150,0	150,0	-----	700,0
40,0	40,0	175,0	-----	750,0	-----
50,0	50,0	200,0	200,0	1000,0	1000,0
60,0	60,0	250,0	250,0	-----	-----
75,0	75,0	300,0	300,0	-----	-----

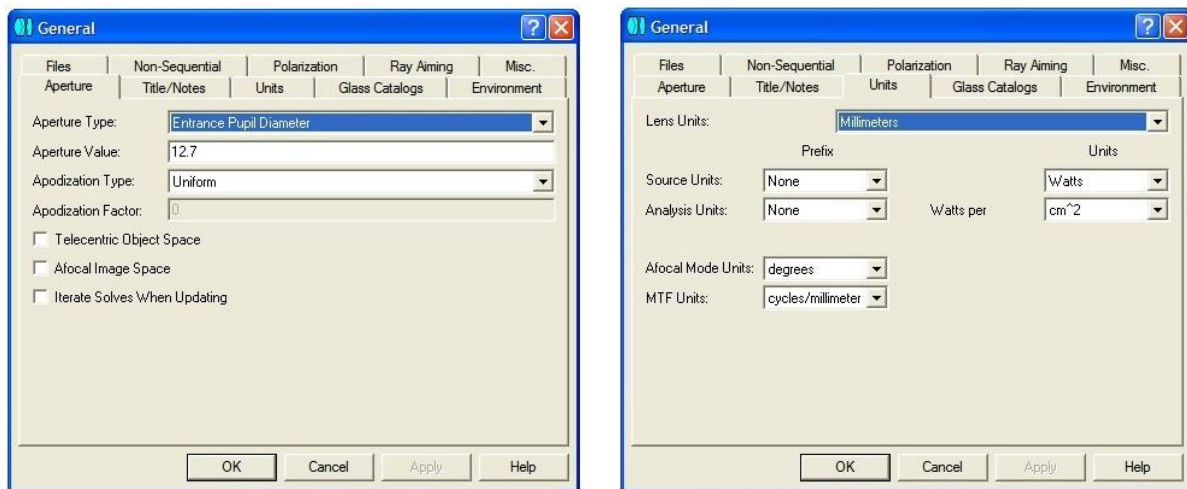


Figura 3.3 – Menu *General* onde se introduz o valor da abertura, o seu tipo, e as unidades utilizadas no sistema.

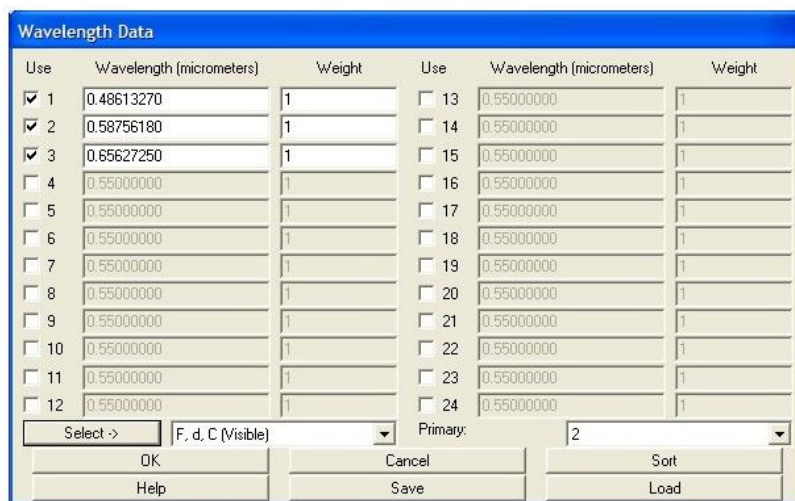


Figura 3.4 - Menu *Wavelength Data* onde se define os comprimentos de onda utilizados durante a simulação.

Uma outra utilidade que o ZEMAX oferece aos seus utilizadores é um vasto catálogo de lentes onde é possível escolher o tipo de material de cada superfície. Para este projeto escolheu-se o material como sendo o vidro N-BK7 e, a partir daqui, todas as simulações efetuadas tiveram em conta o índice de refração e o coeficiente de expansão térmica fornecidos por esta base de dados.

A otimização do sistema foi feita em duas fases. A primeira consistiu em determinar qual a lente mais adequada para o primeiro percurso ótico, de modo a que a imagem projetada no DMD ficasse bem focada e não ultrapassasse os 3,699 mm. Para tal, testaram-se lentes com distâncias focais entre os 100 mm e os 250 mm, chegando à conclusão de que poderia ter uma distância focal de 150 mm. Para o segundo percurso ótico, teve-se em conta que a imagem projetada no fotodíodo devia ter uma altura máxima de 2,4 mm. As distâncias focais testadas para a segunda lente foram as mesmas de que para a primeira. No entanto, para prevenir os erros que possam surgir relativamente ao desvio angular dos raios de luz, optou-se por colocar uma lente com as mesmas características que a primeira. Deste modo a imagem formada nesta lente é igual à imagem da pupila. Para a terceira lente, verificou-se que para uma distância focal inferior a 50 mm, a imagem formada no fotodíodo era sempre superior à exigia.

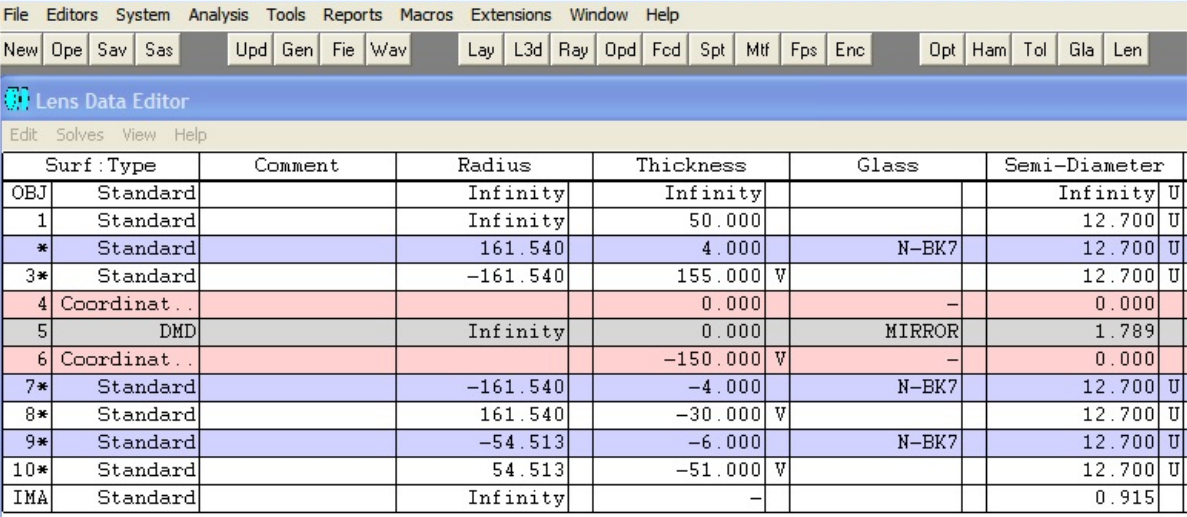
Tendo em conta os requisitos do sistema e com o objetivo de minimizar o percurso ótico total, estipulou-se que o sistema seria constituído por duas lentes de 150 mm e uma outra de 50 mm.

Tabela 3.2 - Características das lentes utilizadas neste projeto

	Lente 1	Lente 2
Referência	p/o CSOPTLENS01 - 111-0222E	p/o CSOPTLENS01 - 111-0210E
Tipo de lente	BK7 bi/cx lens	BK7 bi/cx lens
Diâmetro (d)	25,4 mm	25,4 mm
Distância Focal (f)	150 mm	50 mm
CT	4 mm	6 mm
ET	3 mm	3 mm
Preço	19 €	21 €
Quantidade	2	1

Durante as simulações, constatou-se que a imagem não estava a ficar bem focada no DMD e que isso se devia à distância entre a lente e este não ser a correta. Para solucionar este problema recorreu-se a ferramentas de otimização que visam corrigir pequenas discrepâncias existentes no sistema ótico projetado, e que têm por base a minimização do valor da função chamada de Mérito (*Merit Function*).

Neste caso em particular, a ferramenta utilizada foi o *Quick Focus*, que permite otimizar a distância (*Thickness*) entre duas superfícies, de modo a que o feixe fique melhor focado. Para tal, é necessário que estes parâmetros estejam definidos como sendo variáveis do sistema. Assim, em vez de se ter uma distância entre lentes equivalente à distância focal da lente, obteve-se uma variação de 5 mm entre ambas. O mesmo procedimento foi feito para o segundo percurso ótico.



The screenshot shows the 'Lens Data Editor' window of a software application. The interface includes a menu bar (File, Editors, System, Analysis, Tools, Reports, Macros, Extensions, Window, Help) and a toolbar with various icons. Below the toolbar, there's a title bar 'Lens Data Editor' and a menu 'Edit Solves View Help'. The main area contains a table with the following columns: Surf, Type, Comment, Radius, Thickness, Glass, and Semi-Diameter. The table lists various surfaces including OBJ, 1, \*, 3\*, 4, 5, 6, 7\*, 8\*, 9\*, 10\*, and IMA, with their respective types, comments, radii, thicknesses, glass materials, and semi-diameters.

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity
1	Standard		Infinity	50.000		12.700
*	Standard		161.540	4.000	N-BK7	12.700
3*	Standard		-161.540	155.000	V	12.700
4	Coordinat..			0.000	-	0.000
5	DMD		Infinity	0.000	MIRROR	1.789
6	Coordinat..			-150.000	V	0.000
7*	Standard		-161.540	-4.000	N-BK7	12.700
8*	Standard		161.540	-30.000	V	12.700
9*	Standard		-54.513	-6.000	N-BK7	12.700
10*	Standard		54.513	-51.000	V	12.700
IMA	Standard		Infinity	-		0.915

Figura 3.5 - *Lens Editor* onde se colocam os parâmetros principais das simulações, nomeadamente, o raio das lentes, a distância entre duas superfícies, o material dos componentes, etc.

Na Figura 3.5 encontra-se uma imagem dos valores introduzidos no ZEMAX e que foram utilizados para realizar a simulação ótica. A coluna *Radius* é onde se introduz o raio de cada lente, que foi calculado a partir da equação 3.1 [17], bem como o raio do objeto (que nesta situação é infinito).

$$s = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{1}{2}d\right)^2} \Leftrightarrow r = \frac{s}{2} + \frac{d^2}{8s} \quad (3.1)$$

Onde

$$s = \frac{CT - ET}{2} \quad (3.2)$$

Na primeira linha da tabela *Thickness* assumiu-se que o objeto está no infinito e que os raios de luz provenientes dele dirigem-se para a superfície de uma lente que tem um CT = 4 mm. As restantes linhas identificam os valores que se queriam determinar no subcapítulo 3.2:  $d_0 = 50$  mm,  $d_1 = 155$  mm,  $d_2 = 150$  mm,  $d_3 = 30$  mm, e  $d_4 = 51$  mm. Em que  $d_3$  pode variar sem alterar o sistema porque os raios entre as duas superfícies são paralelos entre si. A tolerância que o ZEMAX atribui a cada distância aqui referida é de 0,2 mm. Há ainda que referir que o ângulo entre os raios do primeiro caminho ótico e do segundo é de  $2\Theta = 24^\circ$  [18].

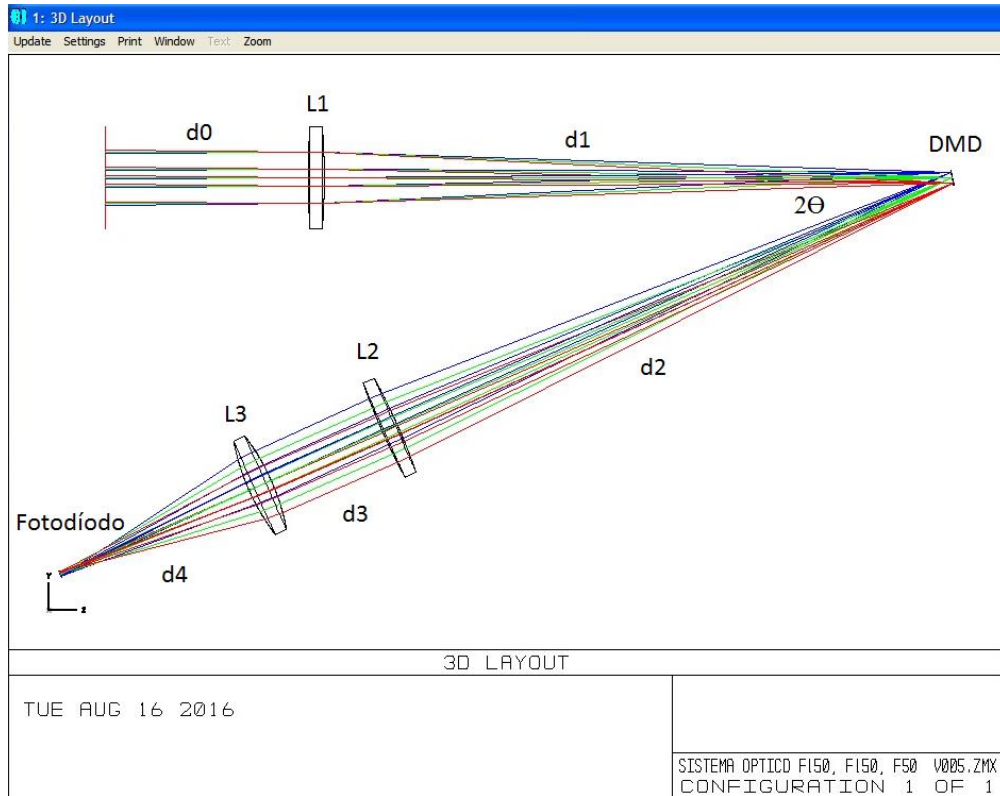


Figura 3.6 - 3D Layout do sistema ótico correspondente à Figura 3.5.



### 3.4 Análise do sistema

Até esta fase, todos os testes foram realizados considerando que o objeto estava no infinito e que os raios atravessavam a primeira lente paralelamente ao eixo ótico. No entanto, para formar uma imagem, é necessário que exista uma variação do ângulo de entrada. Para tal, introduziu-se no *Field Data* uma variação angular dos raios entre -0,4 e 0,4 graus, o que equivale a uma abertura de campo de 0,8 graus (Figura 3.7). Com estes parâmetros a imagem formada no DMD toma o valor de  $(1,789 \text{ mm}) \times 2$ . Caso se colocasse uma abertura de 0,46 a imagem tomaria o valor de  $(2,011 \text{ mm}) \times 2$ , passando assim os  $(1,8495 \text{ mm}) \times 2$  requeridos. É nesta fase que a variação do comprimento de onda introduzido na Figura 3.4 toma peso. Caso a simulação fosse efetuada apenas com os tradicionais 0,558 mm, para uma abertura de 0,46 mm, obteríamos uma imagem com  $(1,821 \text{ mm}) \times 2$ , o que ficticiamente ia de encontro com o nosso interesse. Mais tarde, este pormenor podia conduzir à perda de parte do campo de visão porque nem todos os pixéis seriam lidos.

Use	X-Field	Y-Field	Weight	VDX	VDY	VCX	VCY	VAN
<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	0.01	0.01	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	0.05	0.05	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	0.1	0.1	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	0.3	0.3	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	-0.3	-0.3	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	0.4	0.4	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/>	-0.4	-0.4	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0.42	0.42	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	-0.47	-0.47	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0.47	0.47	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/>	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Figura 3.7 - *Field Data* – Menu onde se introduz o ângulo de entrada da luz que incide na primeira lente.

Uma análise complementar à anterior é a do *Spot Diagram*. Esta análise permite visualizar o grau de dispersão dos feixes de luz mediante o comprimento de onda e ângulo de incidência. Na Figura 3.8 observa-se que, quando combinando estes dois fatores, os comprimentos de onda próximos do ultravioleta (0,38 mm) tendem a ter uma maior dispersão do que os do infravermelho (0,74 mm) e do azul (0,55 mm).

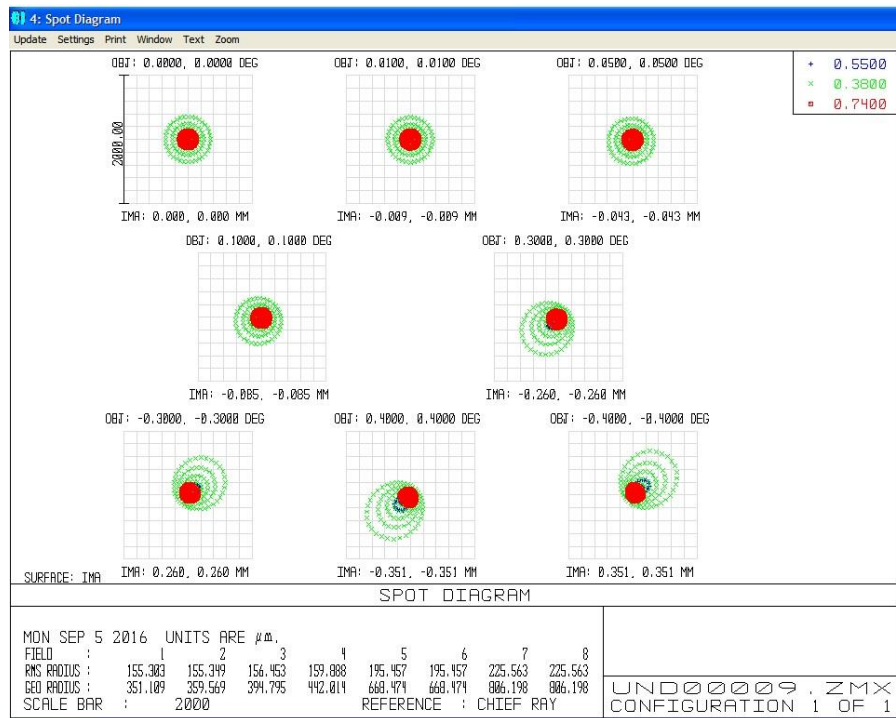


Figura 3.8 - *Spot Diagram* para comprimentos de onda, compreendidos entre o ultravioleta e o infravermelho. Nesta simulação observa-se uma aberração cromática para ângulos de entrada diferentes de zero.

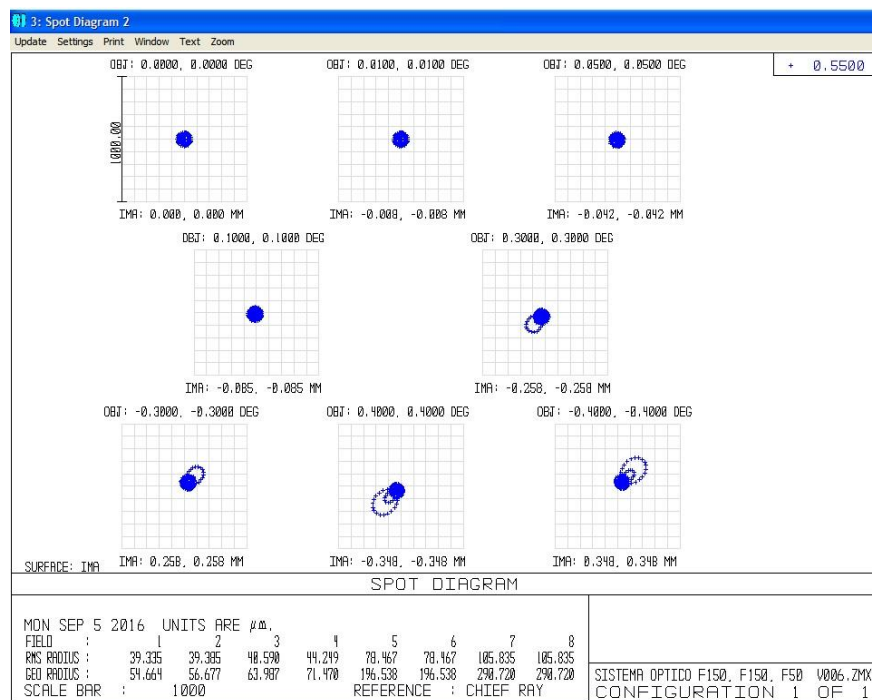


Figura 3.9 - *Spot Diagram* para o comprimento de onda do azul. Esta simulação é idêntica à da Figura 3.8 mas sem considerar os restantes comprimentos de onda.

# Capítulo 4

## *Projeção dos componentes optomecânicos*

### 4.1 Modelação em CAD

Os desenhos técnicos dos componentes optomecânicos foram desenvolvidos no programa CAD SolidWorks (versão 2015) [20]. Este, utiliza o desenho paramétrico para projetar objetos 3D a partir de relações geométricas e dimensionais, entre diferentes formas regulares. Portanto, se um parâmetro for alterado durante o projeto, a forma do objeto é recalculada localmente e ajustada às novas dimensões, evitando-se assim erros de escalamento e de posicionamento.

O SolidWorks permite trabalhar em três modos diferentes, que passo a discriminar:

- O modo *Part* cria um ficheiro *.sldprt* onde se desenvolve a modelação de peças individuais;
- O modo *Assembly* cria um ficheiro *.sldasm* onde se combinam várias peças individuais de modo a criar um único objeto;
- O modo *Drawing* cria um ficheiro *.slddrw* onde se exibe as várias perspetivas 2D de um objeto e as respetivas dimensões.

Para criar uma peça, é necessário combinar ferramentas dos menus *Sketch* e *Feature*. No *sketch* elaborase o esboço da face de um objeto, enquanto numa *feature* cria-se o efeito tridimensional através da extrusão do mesmo. Este processo é feito de modo incremental e pode ser monitorizado numa janela paralela ao esboço, onde estão esquematizadas todas as alterações efetuadas ao longo do projeto. Esta característica permite ao utilizador alterar parâmetros iniciais sem prejudicar o trabalho recente.

Uma outra vantagem deste programa reside na capacidade de criar montagens de várias peças antes de as mandar fabricar. Estas simulações permitem verificar se as peças encaixam bem umas nas outras ou se existe algum desvio. Todavia, para evitar este tipo de erros, é importante definir qual a precisão da tolerância associada a cada dimensão.

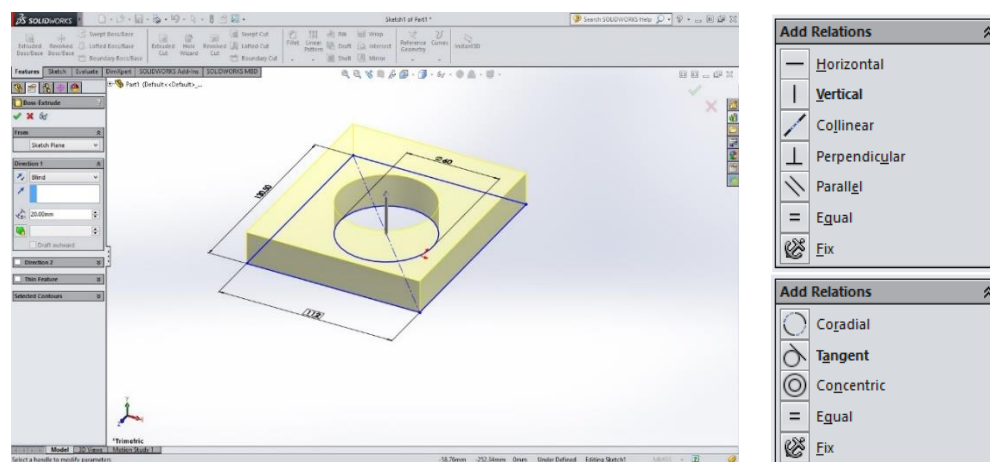


Figura 4.1 - a) Ambiente gráfico do SolidWorks onde se elaboram os esboços de modelos técnicos. b) Algumas das relações que se podem aplicar entre formas regulares.

## 4.2 Análise e desenvolvimento de suportes

O plano de desenvolvimento dos componentes optomecânicos foi dividido em diversas etapas de conceção e consolidação, que tiveram em vista objetivos bem concretos. A primeira etapa consistiu no levantamento de informação sobre o funcionamento de suportes optomecânicos, [21,22,23] e na escolha do local onde o sistema seria implementado. Tendo em vista a estabilidade do sistema ótico, optou-se por utilizar uma mesa ótica (60 cm × 60 cm) que estava disponível no laboratório do Grupo. A segunda etapa focou-se na elaboração dos primeiros esboços técnicos (e respetivo fabrico). Um dos objetivos propostos para esta elaboração foi que os suportes fossem, maioritariamente, constituídos por peças produzidas em impressoras 3D, e que as peças auxiliares estivessem disponíveis em lojas comerciais, como o Aki ou Leroy Merlin. Os restantes objetivos tiveram em vista a otimização e interligação das seguintes variáveis:

- 1) Distâncias entre os componentes (Definidas no Capítulo 3);
- 2) Área total da mesa ótica;
- 3) Diâmetro e espessura das lentes;
- 4) Minimização da área ocupada pelos suportes;
- 5) Estabilidade dos suportes;
- 6) Elaboração de um método para segurar os suportes na mesa;
- 7) Elaboração de um método para unir várias peças;
- 8) Propriedades mecânicas do material *Polylactic Acid* (PLA);
- 9) Relação entre a espessura dos suportes e a resistência do PLA;

De forma a respeitar os pontos 1, 2, 3, 4 e 5, produziram-se os modelos da Figura 4.2. Ambos os suportes mostraram ser estáveis e de fácil reprodução, porém, constatou-se que esta abordagem apenas permite fazer o alinhamento do sistema ótico segundo as direções XY, e de modo controlável. De forma a evitar níveis de refração de luz que não foram totalmente contabilizados na simulação anterior, decidiu-se que, na etapa seguinte, seria preferível desenvolver um suporte que possa corrigir o alinhamento do sistema de forma simples, e que esse ajuste englobasse também o eixo vertical.

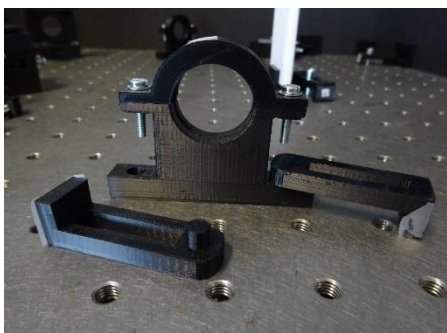


Figura 4.2 – Protótipos, de um suporte de lentes, realizados na fase de testes.

Como solução para o ponto 6, projetou-se um suporte que é facilmente acoplado a um suporte e a uma mesa ótica com furos de 6 mm de diâmetro (Figura 4.2 e 4.3a). Já para o ponto 7, optou-se por utilizar parafusos e porcas de 3 mm (de metal) porque os parafusos fabricados com os materiais disponíveis (PLA, ABS e resina) desgastam-se e quebram-se facilmente nas zonas de torção.

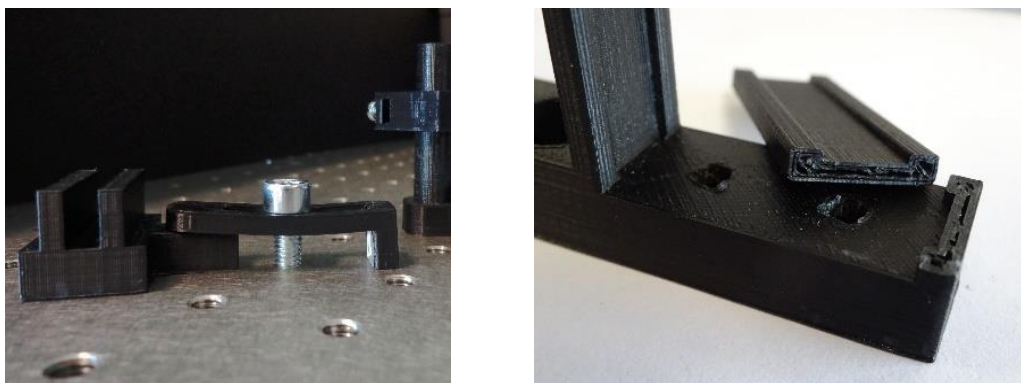


Figura 4.3 - a) Suporte de fixação. Observa-se que esta peça precisa de ser resistente devido ao aperto dos parafusos. b) Suporte para lentes que não mostrou ter a resistência necessária para o nosso sistema.

Com base neste estudo, concluiu-se que os pontos 4, 8 e 9 estão intrinsicamente ligados porque os suportes com espessuras finas ( $\sim 3$  mm) acabam por se partir quando expostos a alguma pressão (Figura 4.3 b). O mesmo acontece em zonas em que é necessário apertar parafusos. Um outro ponto a reter reside nas dimensões atribuídas às zonas de encaixe. Por exemplo, para um parafuso com um diâmetro de 3 mm, é necessário que a abertura onde ele vai ser inserido tenha, pelo menos, uma tolerância de  $+ 0,2$  mm.

Em prol de aperfeiçoar os suportes óticos, a terceira etapa do planeamento abordou a ideia de desenvolver um método que permitisse efetuar movimentos precisos no eixo vertical. Para tal elaboraram-se dois esboços. O primeiro consistiu em regular a altura através de parafusos que estariam colocados debaixo do suporte, e o segundo substituiria os parafusos por molas. Ambos os modelos demonstraram ser instáveis pois o movimento vertical não era simétrico em ambas as extremidades do suporte (Figura 4.4).

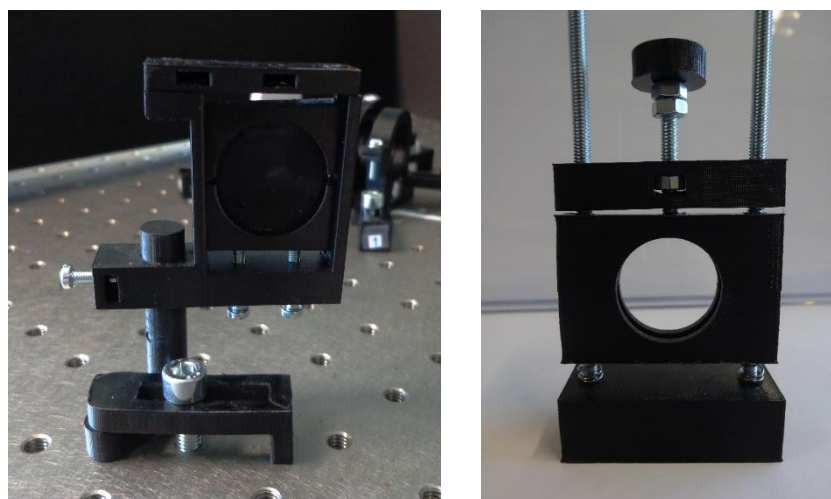


Figura 4.4 - Protótipos, de um suporte de lentes, realizados na fase de testes.

Por fim, o *know-how* adquirido após a execução dos vários modelos anteriormente apresentados, levou à implementação de um mecanismo móvel formado por uma peça em forma de calha, onde é fixada uma porca de 4 mm, e uma segunda peça que contém um orifício onde é introduzida a cabeça de um



parafuso de 4 mm. (Figura 4.5 a). Este conceito proporciona um movimento milimétrico significativamente coerente, e pode ser facilmente adaptado aos eixos X, Y e Z. A quarta, e última etapa do desenvolvimento optomecânico centrou-se em consolidar este mecanismo e aplicá-lo ao suporte de lentes e do fotodíodo, bem como projetar o suporte do DMD.

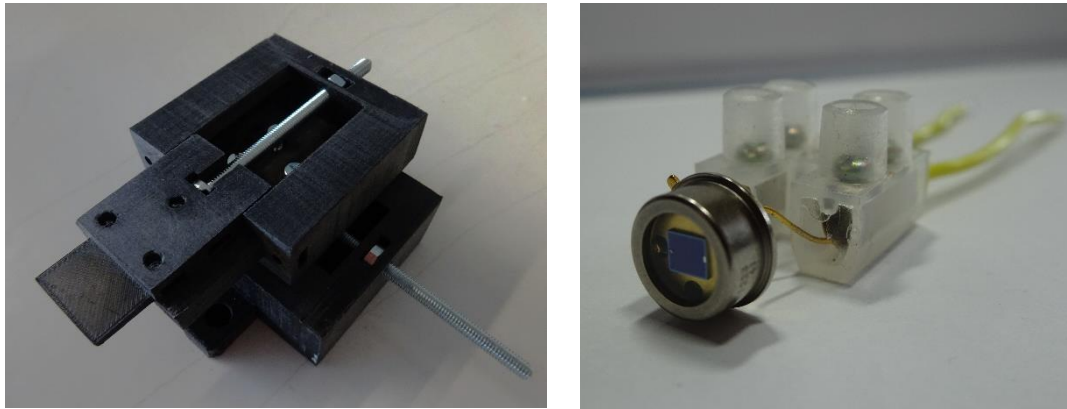


Figura 4.5 - a) Suporte móvel nos eixos X e Y. b) Acoplador que permite a conexão do fotodíodo ao sistema eletrónico.

Como tal, dividiu-se o suporte em três patamares, unidos entre si, através de três parafusos e porcas de 3 mm. O número de parafusos foi escolhido considerando a estabilidade do suporte. Inicialmente realizaram-se testes com apenas dois parafusos, no entanto, verificou-se que, durante os movimentos, as plataformas não ficavam completamente assentes uma na outra. Após resolvido o problema da deslocação, projetaram-se duas peças individuais, que circundam a lente, e encaixam na calha do eixo Z. O modelo CAD final do suporte das lentes encontra-se ilustrado na Figura 4.6 e tem um grau de liberdade, em todos os eixos, de aproximadamente 5,6 mm.

Quanto ao suporte do fotodíodo, aproveitou-se a estrutura dos eixos desenhados para o suporte de lentes e concebeu-se um suporte específico para colocar na calha do eixo Z. Este suporte foi desenhado tendo em conta as medidas do acoplador apresentado na figura 4.5 b). No caso do suporte do DMD, como este não precisa de se mover em todos os eixos, projetou-se uma montagem semelhante ao tripé de um telescópio, de forma a poder ser alinhado com uma bolha de nível. Esta característica permite que não haja uma variação na inclinação dos microespelhos. Uma vez montado, este suporte fica fixo e os restantes suportes é que se adaptam a ele.

No total, para construir estes suportes, apenas é necessário ter acesso a uma impressora 3D, a parafusos de 3 mm, 4 mm e 6 mm, a porcas de 3 mm e 4 mm e a um acoplador para os cabos. No apêndice A, estão ilustradas as diversas vistas e dimensões dos suportes finais.

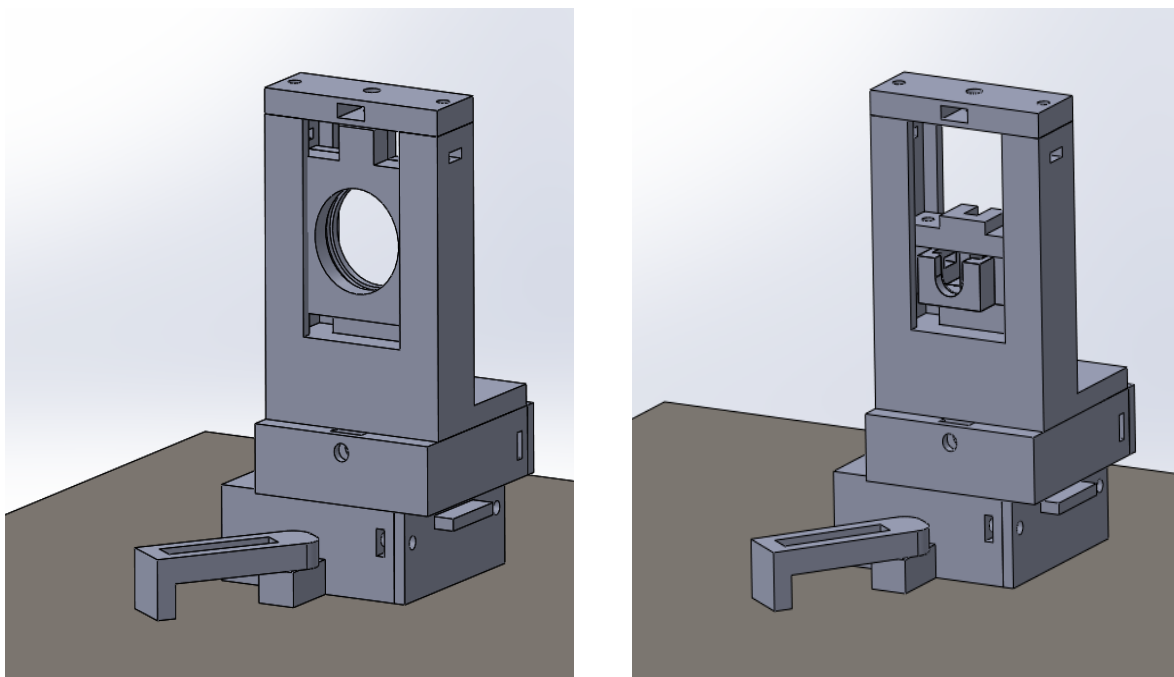


Figura 4.6 - Modelo CAD do suporte das lentes e do suporte para o fotodíodo. Ambos são constituídos por um total de 12 peças produzidas em impressoras 3D.

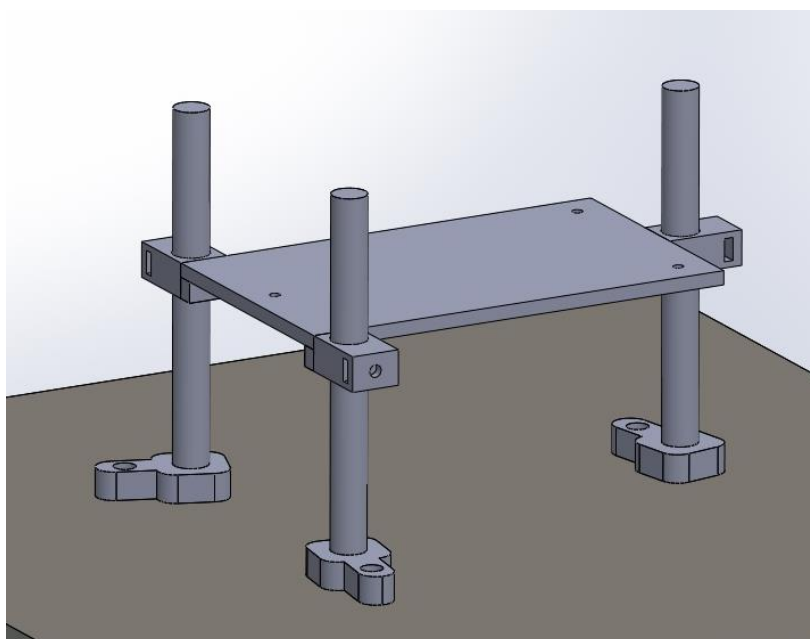


Figura 4.7 - Modelo CAD do suporte da placa eletrônica onde está inserido o DMD.

# Capítulo 5

## *Impressão 3D*

### 5.1 Contexto

A impressão 3D é uma tecnologia que surgiu no início dos anos oitenta do século passado [24], e baseia-se em técnicas de modelação aditiva para criar objetos tridimensionais sem o auxílio de moldes pré-concebidos. Atualmente existe uma grande variedade de impressoras 3D associadas a diferentes técnicas de impressão:

Técnica *Fused Deposition Modeling* (FDM) → É utilizada para fabricar peças a partir de filamentos de plástico ou de metal [25].

Técnica *Stereolithography* (SLA) e *Digital Light Processing* (DLP) → Usa-se para curar resinas nas zonas regiões que definem o objeto.

Técnica *Selective Laser Sintering* (SLS), *Selective Laser Melting* (SLM) e *Electronic Beam Melting* (EBM) → É direcionada para a modelação de metal.

Técnica *Laminated Object Manufacturing* (LOM) → Funciona à base de plástico e metal. [26]

Inicialmente, os objetos impressos são desenvolvidos em programas CAD, guardados em ficheiros no formato *.stl* [27], de forma a serem compatíveis com os programas onde se controlam os parâmetros de impressão. Estes variam de técnica para técnica e essencialmente especificam a velocidade de impressão, a percentagem de preenchimento do objeto, a espessura dos suportes, a orientação em que a peça é impressa, etc. Depois de inseridas todas as configurações, o ficheiro é guardado num formato específico de cada impressora e encaminhado para a mesma.

Devido à facilidade em imprimir objetos de alguma complexidade geométrica, as aplicações da impressão 3D estendem-se a várias áreas da ciência, indústria, design e educação [28]. Um dos casos mais notórios é a medicina, onde é possível fabricar próteses ósseas, orelhas biónicas, vasos sanguíneos e prevê-se que no futuro se consigam imprimir órgãos e enxertos de pele a partir de células do próprio paciente. [29]. Um outro exemplo é o da exploração espacial. Neste momento a ESA está numa fase de testes para construir uma impressora que seja capaz de imprimir bases lunares a partir de materiais existentes na lua [30], e também já testou e implementou esta tecnologia em peças que fazem parte do foguetão Ariane 6 [31].

Apesar da impressão 3D estar mais direcionada para áreas de indústria e de investigação, estima-se que o que o número de vendas global em 2019 suba até os 5,6 milhões de unidades [32], o que vem a revelar um aumento de vendas para consumo doméstico. Esta mesma tendência é observada pelo aumento de plataformas *open-source*, como a *thingiverse.com*, onde qualquer pessoa pode fazer o *download* e/ou *upload* de ficheiros. Deste modo, mesmo quem não saiba trabalhar com programas CAD pode facilmente tirar proveito destas impressoras.

Este capítulo tem como objetivo explorar o funcionamento das técnicas FDM e SLA em aplicações optomecânicas, descrever quais os problemas associados a cada uma delas e sugerir possíveis soluções.



Os testes efetuados foram realizados nas impressoras Ultimaker 2 [33] e Form 1+ [34], que estão instaladas num dos laboratórios do grupo CENTRA/SIM situado na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL).

## 5.2 Técnica FDM

A técnica FDM está direcionada para a prototipagem de objetos a partir de materiais termoplásticos como o *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) e PLA. A sua aplicação consiste em introduzir um filamento de plástico dentro do bico de impressão, denominado por *nozzle*, e aquecê-lo até o filamento atingir um estado semilíquido. A temperatura aplicada no *nozzle* é regulada pelo utilizador e deve corresponder, aproximadamente, à temperatura de difusão do material utilizado. Posteriormente, o material é ejetado e depositado numa mesa onde arrefece e retorna ao estado sólido. [35]. O *nozzle* está acoplado a uma cabeça de extrusão que se move no eixo XY, e que é responsável por distribuir o material ao longo da mesa (movível no eixo Z). Assim que a camada fica completa, a plataforma baixa de modo a que a seguinte camada possa ser depositada. É a combinação destes três eixos que proporciona a construção de um objeto tridimensional camada-a-camada.

Para testar esta técnica utilizou-se a impressora Ultimaker 2 e o programa Cura[36], cujo propósito é o de definir a orientação, o tipo de suportes, a densidade, a resolução e a velocidade de impressão. Este último parâmetro depende do detalhe do objeto, do seu tamanho e do tipo de material utilizado.

### 5.2.1 Materiais

Neste projeto efetuaram-se testes com os termoplásticos ABS e PLA, com o objetivo de identificar qual deles é o mais indicado para a prototipagem de suportes optomecânicos.

#### Características do ABS:

- Ponto de fusão entre 225°C e 245°C [37];
- É um material resistente a temperaturas elevadas;
- É utilizado em aplicações mecânicas;
- A impressora precisa de estar num local arejado porque, durante a impressão, o ABS liberta partículas e um cheiro forte [38];
- Necessita de uma plataforma aquecida (a 80°C).

#### Características do PLA:

- O ponto de fusão entre 145°C e 160°C [38];
- Quando exposto a temperaturas superiores a 60°C, [40] as peças podem sofrer o efeito de *warping* (Pag.22);
- É menos resistente que o ABS;
- Permite obter objetos mais detalhados do que o ABS;
- Deriva de materiais orgânicos e renováveis [41];
- Ao contrário do ABS, não necessita de ventilação pois tem um cheiro agradável e não tóxico;

- Ideal para velocidades elevadas de impressão [38];
- Não necessita obrigatoriamente de uma plataforma aquecida para imprimir os objetos.

Com base nas características aqui mencionadas e nos testes realizados no laboratório, concluiu-se que o material adotado para a prototipagem dos componentes optomecânicos seria o PLA. As razões principais para esta escolha foram: 1) O ABS possui um cheiro muito intenso e o laboratório não possui ventilação suficiente para a sua extração, 2) Observou-se que quando ocorrem variações de temperatura ambiente, o ajuste a aplicar na temperatura do nozzle é superior no ABS e 3) As peças propostas necessitam de um detalhe o mais rigoroso possível.

### 5.2.2 Problemas de impressão

Durante os testes de impressão surgiram alguns problemas técnicos que afetaram o desempenho da impressora e a qualidade das peças. Este subcapítulo visa indicar as soluções encontradas para os resolver:

1) Pode acontecer que uma peça não adira corretamente à mesa de impressão, ou que as duas extremidades levantem um pouco (Figura 5.1 a). Este comportamento é chamado de **Warping**. Ele ocorre porque, quando arrefecido, o plástico tende a encolher, dando origem à deformação dos cantos [41].

Soluções adotadas:

- Regular a temperatura da mesa onde as camadas vão ser depositadas;
- Colocar uma camada de cola na plataforma para o material aderir com maior facilidade;
- Antes de voltar a imprimir, deve-se remover todos os vestígios de cola que se encontram na plataforma para que a superfície volte a ficar uniforme. Para este feito recomenda-se utilizar acetona por ser um bom solvente para os plásticos;
- Adicionar uma aba/saia ao objeto de modo a aumentar a área superficial de contacto;
- Desenhrou-se e imprimiu-se uns suportes para colocar uma tampa na impressora para que a temperatura fique homogénea (Ver apêndice C).

2) Quando a superfície superior de um objeto não está completamente preenchido ou apresenta buracos, dá-se o nome de **Pillowing** (Figura 5.1 b). Este comportamento surge devido aos parâmetros de impressão não serem os mais corretos para as condições ambientais na qual a impressão está ocorrendo. [43].

Soluções adotadas:

- Arrefecer as camadas colocando a velocidade das ventoinhas a 100%;
- Diminuir a velocidade da cabeça de extrusão para que o material tenha mais tempo para arrefecer;
- Aumentar a resolução das últimas camadas. É aconselhado que este valor seja 6x superior ao da resolução das camadas interiores. Caso esta seja 0,1mm, as últimas camadas devem ter 0,6mm;
- Aumentar a percentagem de preenchimento do objeto.

3) Os problemas de **extrusão** ocorrem quando a impressora não é capaz de ejetar material suficiente pelo nozzle. Isto é visível quando algumas camadas aparecem demasiado finas, por preencher ou com buracos aleatórios (Figura 5.1 c) [44].

Soluções adotadas:

- Verificar se a pressão que motor exerce no filamento está bem ajustada. Uma pressão errada pode danificar algumas zonas do filamento e fazer com que este não fique uniforme ao longo de todo o seu comprimento;
- Recalibrar a plataforma;
- Limpar a cabeça de extrusão da impressora com acetona;
- Aumentar ou diminuir a temperatura do nozzle. Quando a temperatura é demasiado baixa o material não se liquefaz totalmente, tornando-se mais difícil de o fazer passar pelo nozzle. Por sua vez, quando a temperatura é demasiado elevada, o material não tem tempo suficiente para enrijecer antes de uma segunda camada ser depositada.

Por vezes a regulação dos parâmetros anteriormente referidos não é suficiente, e durante este trabalho, foi necessário substituir uma das ventoinhas e o sensor de temperatura. A substituição da ventoinha deveu-se ao facto de que ao estar uma ventoinha parada, as peças começaram a apresentar deformações por não solidificarem de forma uniforme. No caso do sensor de temperatura, mesmo estando indicado no visor que a temperatura estava a 260°, observou-se que o material não estava a ser submetido a uma temperatura suficiente para provocar uma transição de estado.

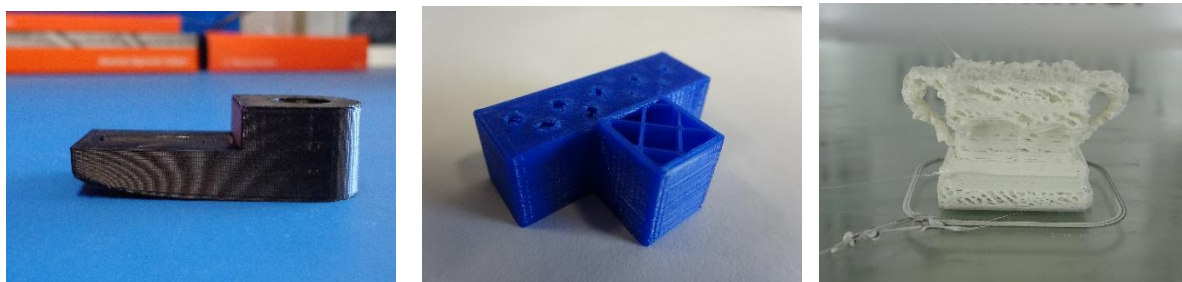


Figura 5.1 – a) Efeito *Warping*. b) Efeito *Pillowing*. c) Efeito de má extrusão

## 5.3 Técnica SLA

A técnica SLA utiliza um laser ultravioleta (UV) para solidificar resina fotossensível. O processo de solidificação passa por projetar o feixe laser no tanque que contém a resina líquida. Quando os dois entram em contacto ocorre uma reação química (polimerização) que endurece a resina. Desta reação surge a primeira camada do objeto. Em seguida a plataforma sobe para o material tomar contacto com o ar e enrijecer. Este processo é realizado n vezes até formar o objeto pretendido. Tal como acontece na Ultimaker 2, antes de colocar o modelo CAD a imprimir, é necessário configurar os parâmetros de impressão. Para este trabalho utilizou-se o programa PreForm (Versão 2.71) [45], que guarda os ficheiros num formato *.form* [46], e é o programa oficial associado à impressora Form 1+. Nesta impressora as peças são impressas com uma certa inclinação para que a resina possa escorrer durante o processo de produção. Para aumentar a área de contacto entre a plataforma e a peça, são colocados

suportes em pontos críticos da peça para evitar que ocorram deformações e torções. Se o utilizador assim o pretender, o programa gera automaticamente suportes nas zonas críticas a partir de análises de elementos finitos [47]. Terminada a etapa de produção, a peça passa por um processo de limpeza na qual é mergulhada num solvente a fim de retirar o excesso de resina e depois é colocada num forno UV para acelerar o processo de solidificação [48, 49]. As impressoras que usam esta técnica estão direcionadas para a precisão e detalhe dos objetos e, no caso da Form 1+, consegue-se alcançar uma resolução de 0,025 mm por camada. Existem quatro tipos diferentes de resina: *Standard* (normal), *Tough* (extra forte), *Flexible* (flexível) e *Castable*, mas ao contrário dos filamentos de plástico, não existem numa grande variedade de cores [50].

### 5.3.1 Materiais

Para o estudo da técnica SLA utilizou-se a resina preta *standard* GPBK02, que permite obter objetos com bastante detalhe, mas que segundo o próprio fornecedor, não é a mais indicada para a prototipagem de peças mecânicas [51]. No início deste projeto, era a única resina que estava disponível no mercado mas, atualmente, existe uma resina mais resistente que contorna os problemas de cariz mecânico [52].

### 5.3.2 Problemas de impressão

Ao contrário da Ultimaker 2, surgiram poucos problemas de impressão com a Form 1+:

- 1) Pode acontecer que a peça não fique completamente terminada porque o tanque ficou sem resina (Figura 5.2 a). Para evitar esta situação é necessário verificar se o mesmo está cheio antes de imprimir e/ou ir verificando os níveis de resina.
- 2) Caso os suportes não sejam suficientemente resistentes, ou que não estejam bem distribuídos, a peça descola-se na base e cai no tanque de resina. Neste caso é preciso aumentar a espessura da base e/ou alterar a orientação da peça [53].
- 3) Quando as peças se descolam dos suportes e estes permanecem na plataforma, é sinal que é preciso aumentar a estrutura dos suportes e a espessura dos mesmos [54].

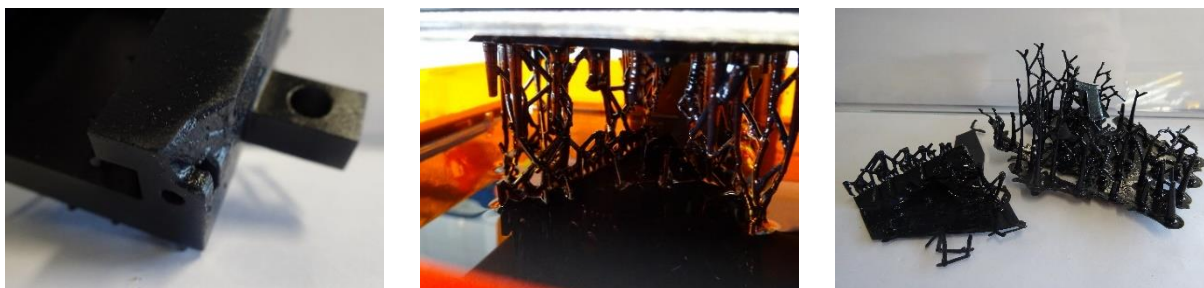


Figura 5.2 - a) Mau acabamento devido à escassez de resina no tanque. b) e c) Imagem referente a um suporte que ficou inacabado porque a peça desprende dos seus suportes e acabou por tombar no tanque de resina.

## 5.4 Características de impressão e custo das peças

Os programas Cura e Preform, além de ajustarem os parâmetros de impressão, indicam os valores estatísticos do tempo que uma peça demora a imprimir, o número de *layers* (camadas), o peso do filamento utilizado no fabrico da peça (para a Ultimaker 2) ou o volume de resina despendido (para a Form 1+). Com base nestes valores, e no preço dos materiais, elaborou-se um estudo para determinar o custo de cada suporte optomecânico aqui projetado. Em ambos os casos, utilizou-se uma resolução de 0,1 mm (espessura de uma camada) e um preenchimento da peça de 100%, que é exagerado para a maior parte das utilizações práticas.

Ao comparar as várias variáveis apresentadas, e sem contabilizar o tempo de cura da resina, verificou-se que para peças de grande porte (Bases), a Ultimaker 2 demora quase o dobro do tempo a imprimir em relação à Form 1+. No entanto, para peças pequenas (tampas e suportes de fixação), ocorre exatamente o oposto, porque a Form 1+ demora o dobro do tempo que a Ultimaker 2. Isto acontece porque as peças impressas na Form 1+ precisam de estar inclinadas para que a resina possa escorrer, durante o processo de impressão, originando assim o aumento do número de camadas. Em termos de custos é notória a diferença entre os materiais. Se o objetivo for minimizar os custos e o tempo de impressão, o ideal é produzir suportes formados por peças de diferentes materiais, não esquecendo os fatores de resistência e de detalhe.

Tabela 5.1 – Dados estatísticos sobre as peças constituintes dos suportes optomecânicos fabricados em termoplásticos tendo por base o valor de 33,0€/750g de PLA [55]:

Suporte para as lentes					
	Tempo (h)	Nº de <i>layers</i>	Peso (g)	Custo	Quantidade
<b>Eixo X - Base</b>	7:35	498	54,00	2,38 €	1
<b>Eixo X - Tampa</b>	0:33	28	4,00	0,18 €	1
<b>Eixo Y - Base</b>	4:35	498	31,00	1,36 €	1
<b>Eixo Y - Tampa</b>	0:25	28	3,00	0,13 €	1
<b>Eixo X &amp; Y - Móvel</b>	1:51	118	14,00	0,62 €	2
<b>Eixo Z - Base</b>	6:53	698	49,00	2,16 €	1
<b>Eixo Z - Suporte Lente 01</b>	0:39	38	5,00	0,22 €	1
<b>Eixo Z - Suporte Lente 02</b>	1:14	68	10,00	0,44 €	1
<b>Eixo Z - Tampa</b>	0:51	58	7,00	0,31 €	1
<b>Suporte de fixação</b>	0:41	138	5,00	0,22 €	2
<b>Custo total</b>	8,40 €				

Suporte para o fotodíodo					
	Tempo (h)	Nº de <i>layers</i>	Peso (g)	Custo	Quantidade
<b>Suporte Principal</b>	22:07	-----	161,00	7,70 €	1
<b>Tampa</b>	0:27	115	3,00	0,13 €	1
<b>Fotodíodo</b>	1:20	241	9,00	0,40 €	1
<b>Suporte de fixação</b>	0:41	138	5,00	0,22 €	2
<b>Custo total</b>	8,67 €				

Suporte para o DMD					
	Tempo (h)	Nº de <i>layers</i>	Peso (g)	Custo	Quantidade
Placa	7:35	98	57,00	2,51 €	1
Poste	2:23	1078	15,00	0,66 €	3
Suporte de fixação	0:41	138	5,00	0,22 €	2
Custo total	4,93 €				

Tabela 5.2 - Dados estatísticos sobre as peças constituintes dos suportes optomecânicos fabricados em resina preta *standard* tendo por base o valor de 162,0€/Litro [50]:

Suporte para as lentes					
	Tempo (h)	Nº de <i>layers</i>	Volume (mL)	Custo	Quantidade
Eixo X - Base	03:25	715	56,25	9,11 €	1
Eixo X - Tampa	01:18	444	6,81	1,10 €	1
Eixo Y - Base	02:39	675	33,96	5,50 €	1
Eixo Y - Tampa	01:10	409	5,41	0,88 €	1
Eixo X & Y - Movível	01:18	510	6,84	1,11 €	2
Eixo Z - Base	03:39	812	113,35	18,36 €	1
Eixo Z - Suporte Lente 01	01:22	470	7,22	1,17 €	1
Eixo Z - Suporte Lente 02	01:45	563	12,17	1,97 €	1
Eixo Z - Tampa	01:20	418	9,43	1,53 €	1
Suporte de fixação	01:26	510	6,57	1,06 €	2
Custo total	43,97 €				

Suporte para o fotodíodo					
	Tempo (h)	Nº de <i>layers</i>	Volume (mL)	Custo	Quantidade
Suporte Principal	14:49	-----	232,05	38,70 €	1
Tampa	00:54	296	4,69	0,76 €	1
Fotodíodo	01:18	383	9,90	1,60 €	1
Suporte de fixação	01:26	510	6,57	1,06 €	2
Custo total	43,19 €				

Suporte para o DMD					
	Tempo (h)	Nº de <i>layers</i>	Volume (mL)	Custo	Quantidade
Placa	05:45	1298	73,40	11,89 €	1
Poste	02:24	929	17,89	2,90 €	3
Suporte de fixação	01:26	510	6,57	1,06 €	2
Custo total	22,71 €				

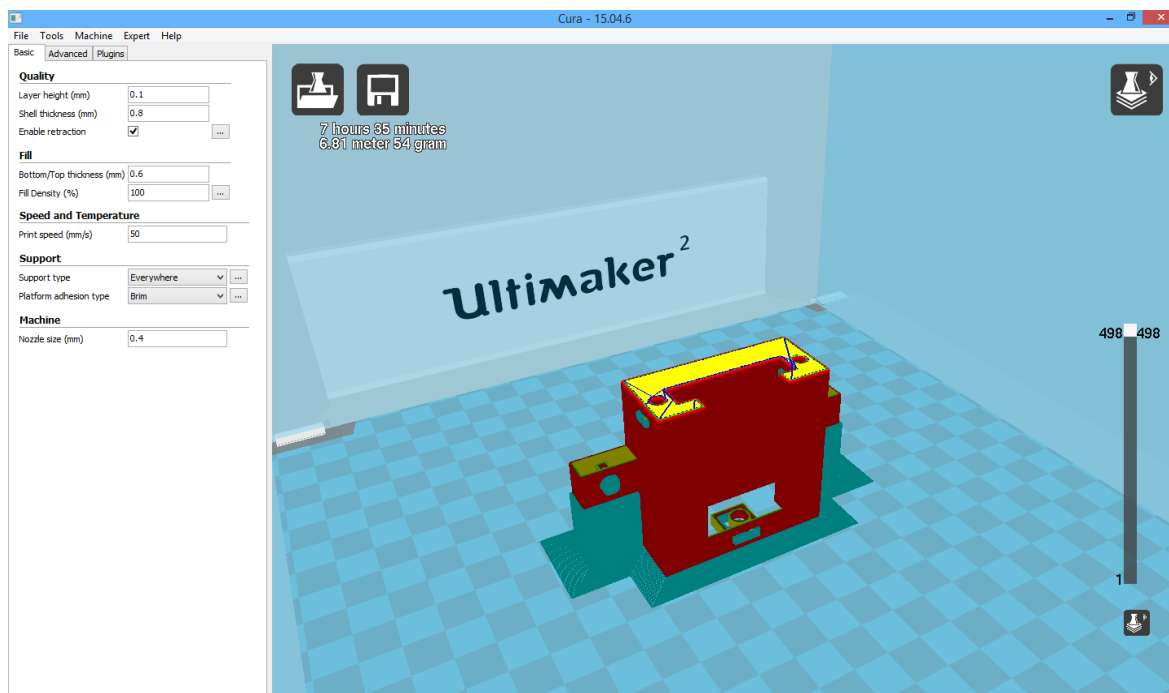


Figura 5.3 - Ambiente gráfico do programa Cura (versão 15.04.06).

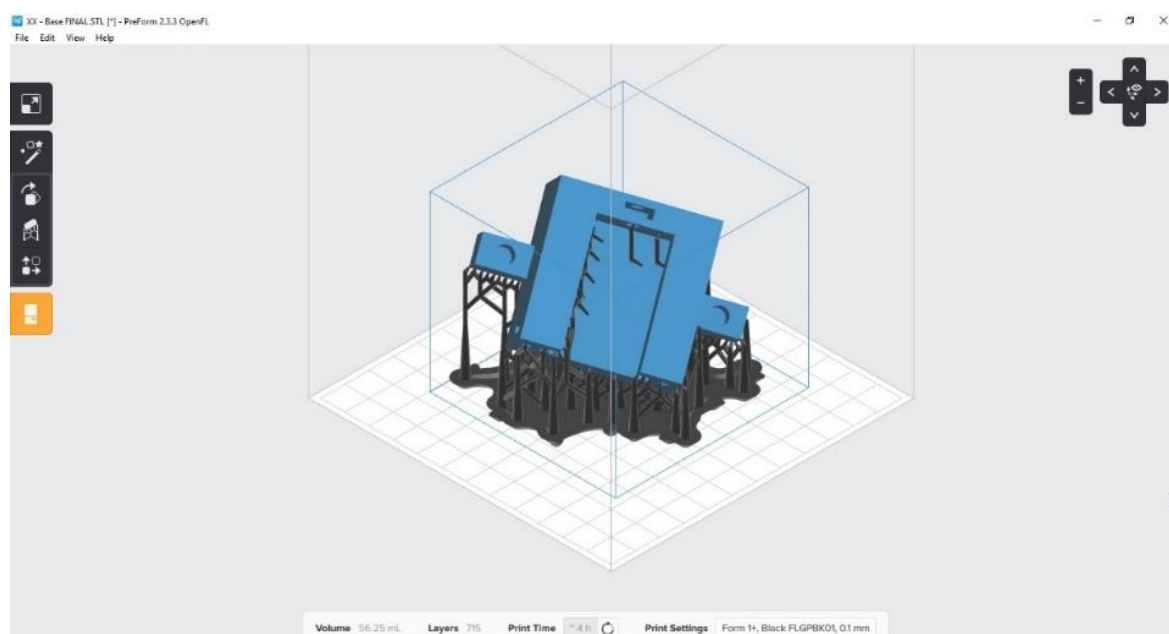


Figura 5.4 - Ambiente gráfico do programa Preform (versão 2.71).

## 5.5 Ultimaker 2 vs Form 1+

Tabela 5.3 – Vantagens e desvantagens da impressora Ultimaker 2

Ultimaker 2	
Vantagens	Desvantagens
Pode ficar muitas horas a imprimir sem necessitar de uma monitorização constante. (Chegou a estar 24 horas seguidas).	A temperatura dos materiais varia porque a impressora não possui um ambiente térmico controlado na área de impressão.
A mesa de impressão tem uma área (223 × 223 mm) que permite imprimir vários objetos ao mesmo tempo [56].	É preciso realizar calibrações frequentes da mesa de impressão.
Terminada a impressão as peças estão prontas a ser utilizadas	Os problemas de impressão surgem com regularidade.
O material é barato, o que é uma mais-valia para a criação protótipos em maior quantidade.	Os suportes quebram o detalhe de algumas zonas das peças.
O material é reciclável e está disponível em várias cores.	Os suportes são colocados de modo automático e não se podem ajustar.
A impressora lê cartões SD.	-----

Tabela 5.4 – Vantagens e desvantagens da impressora Form 1+

Form 1+	
Vantagens	Desvantagens
Tem uma resolução de 0,025 mm [57], o que permite obter peças com bastante detalhe.	A necessidade de colocar suportes leva a um consumo excessivo de resina.
Não necessita de calibração.	A plataforma de impressão é pequena (125 × 125 mm) [57].
Pode-se escolher onde colocar os suportes.	Depois de impressas é obrigatório efetuar um processo de limpeza das peças.
Mesmo depois de retirar os suportes, as peças continuam a ter um bom detalhe.	Precisa de um forno UV para curar as peças, caso contrário elas demoram muito tempo a endurecer.
O ambiente de impressão é hermético.	No caso de peças grandes é necessário que o reservatório seja reabastecido manualmente.
-----	É preciso ligar via USB para o ficheiro ser lido.
-----	O material é caro e não é reciclável.



# Capítulo 6

## *Análise e acabamento das peças*

### **6.1 Pós-Impressão**

Com a tecnologia atual de consumo, o processo de prototipagem de peças não termina quando a última *layer* é depositada. Após a impressão, é necessário realizar o tratamento das peças de modo a limar possíveis imperfeições. No caso da Ultimaker 2, para além dos problemas referidos no subcapítulo 5.2.2., as imperfeições também podem dever-se ao modo com que a peça é retirada da mesa de impressão. Um dos cuidados a ter é o de deixar a mesa arrefecer para que as peças se desprendam da mesma. Caso isso não aconteça, deve-se colocar acetona em torno das abas da peça para que o plástico se solte. Só em última instância é que se recorre a uma espátula porque pode suscitar deformações nas extremidades das peças. Depois de arrefecidas, é necessário retirar os suportes das mesmas. A maioria sai manualmente, porém, existem situações em que é inevitável utilizar um X-ato para os remover. Só depois destas etapas é que se procede ao tratamento mecânico e químico das peças.

A Form 1+ tem um procedimento de pós-impressão um pouco diferente da Ultimaker 2. Depois de impressas as peças ficam coladas à mesa e é realmente necessário utilizar uma espátula para as descolar. Por conseguinte, colocam-se as peças num reservatório repleto de álcool isopropílico (IPA, 2-Propanol) de forma a retirar o excesso de resina que ficou incrustado nas peças. Concluída a fase da limpeza, as peças devem ser colocadas num forno UV para que fiquem rijas e prontas a serem manuseadas. Como o laboratório não possui um forno optou-se por expor as peças ao sol. Todavia, este método não é o mais eficaz porque durante os meses mais frios as peças podem demorar cerca de uma semana até curarem. Um outro cuidado a ter é o de apenas retirar os suportes depois das peças estarem rijas porque essa ação pode levar a deformações.

O tratamento mecânico aplicado a todas as peças passou por se utilizar duas lixas manuais (P120 e P240) e um conjunto de lixas singulares que chegam a zonas menos acessíveis. Este processo pode ser demorado, tudo depende do grau de deformação das peças (Figura 6.1 c). No decorrer deste estudo observou-se que as zonas adjacentes aos suportes apresentam mais deformações. Assim sendo, antes de colocar uma peça a imprimir, é importante verificar a orientação das peças de modo a minimizar este tipo de erro. Um outro ponto a salientar é o fato de que as peças formadas à base de resina serem mais rígidas e menos deformáveis do que as de PLA, podendo assim quebrar mais facilmente em situações de choque. Este indício comprova que a resina *standard* não é a mais indicada para o fabrico de componentes optomecânicos.

Para finalizar, aplica-se um tratamento químico sobre as peças. Para o PLA costuma-se empregar uma camada de acetona para remover vestígios de plástico solto. Caso queiramos ser mais perfeccionistas, é comum passar uma camada de resina, ou então usar vapor frio de acetona. Este método concebe às peças, uma superfície mais suave e brilhante [58,59]. Por outro lado, as peças de resina são tratadas com uma camada de verniz.

Para além de fazer os acabamentos dos suportes foi necessário utilizar a fresadora Dremel 4000 para redimensionar os parafusos que unem as peças e que dão forma um a suporte único.

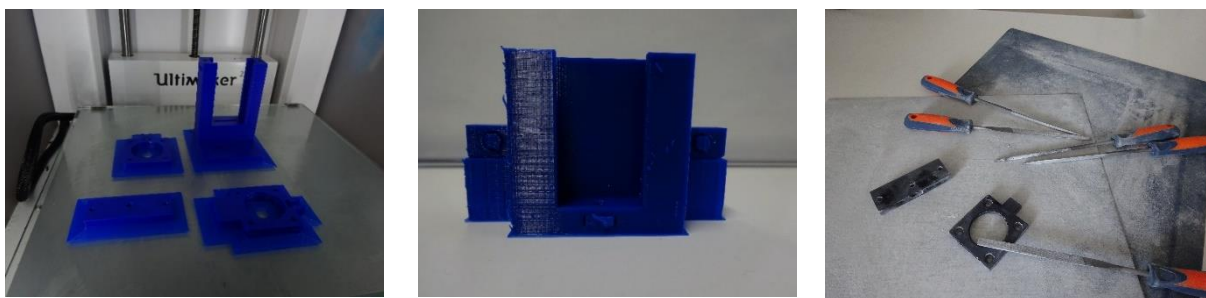


Figura 6.1 – a) Conjunto de peças impressas na Ultimaker 2. b) Peça em PLA com suportes. c) Materiais utilizados para alisar as peças.

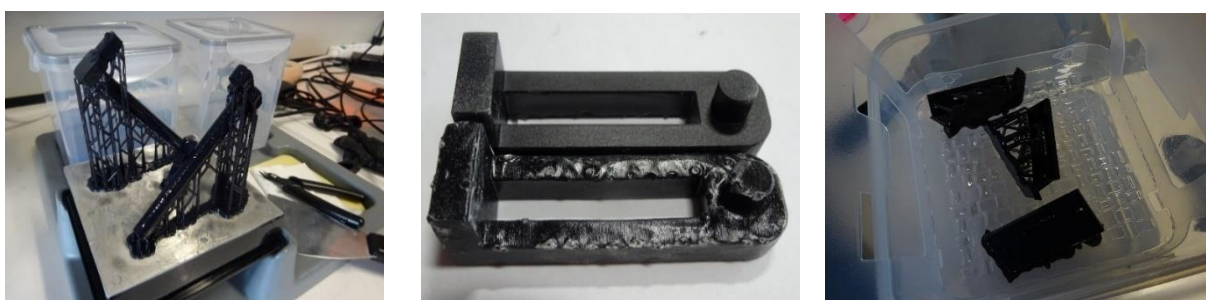


Figura 6.2 – a) Conjunto de peças impressas na Form 1+. b) Diferença no acabamento das peças conforme a orientação em que é impressa. c) Processo de limpeza das peças num reservatório com álcool isopropílico.

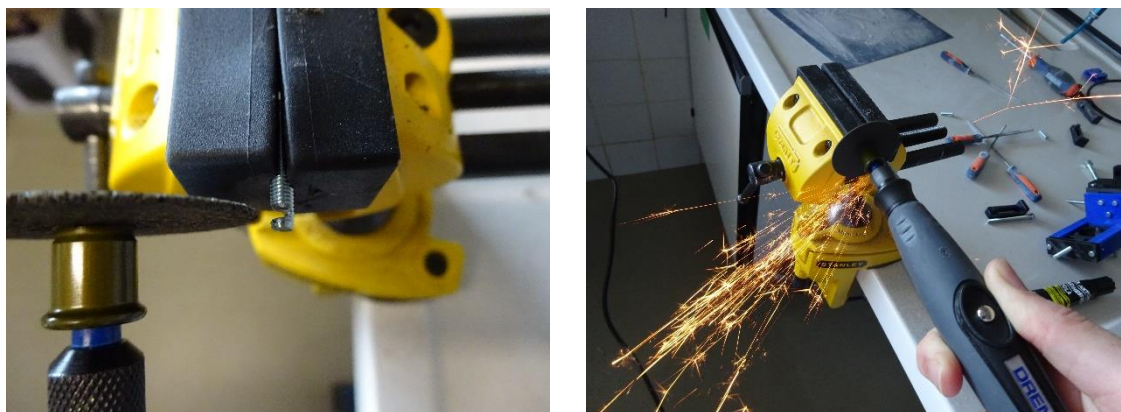


Figura 6.3 – Redimensionamento do comprimento dos parafusos.

## 6.2 Tolerâncias

Para complementar o estudo sobre impressão 3D efetuaram-se medições de algumas das peças impressas, com o intuito de averiguar, qual seria a variação entre as dimensões impostas, no desenho técnico, e as obtidas na peça. Todos os valores aqui apresentados foram obtidos com a craveira digital Mitutoyo CD – 6” PSX. Conforme se verifica nas tabelas 6.1 e 6.2, o desvio padrão da componente aleatória do erro, de cada medição, não demonstrou ser relevante para o erro absoluto obtido. O erro absoluto foi calculado fazendo a diferença entre os valores teóricos e valores médios medidos para cada dimensão representada na Figura 6.4. Para uma resolução de 0,1 mm por camada, obteve-se uma variação entre -0,33 mm e 0,2 mm para o PLA, e entre - 0,38mm e 0,42 mm para a resina. O facto de as peças à base de resina apresentarem mais erros pode dever-se às marcas que os suportes deixam na peça e também por alguma resina extra não ter saído no processo de limpeza (mesmo sendo este o método de remoção indicado pelo fabricante). Apesar do erro máximo ser atribuído ao valor *b* da peça produzida em resina, o erro mais relevante está associado a formas circulares (ex. buracos) pois, caso estas dimensões não sejam exatas, algumas peças podem não encaixar umas nas outras devido à falta de concentricidade entre elas (Esta ocorrência fez-se notar quando se tentou unir as tampas às respetivas bases). Conforme indicado na tabela 6.2, este erro sobressai-se mais nas peças de PLA, onde os valores *g* e *h* variam 0,23 mm, enquanto que na resina variam apenas 0.1 mm. Para além do mais, no apêndice B estão representadas duas tabelas (B.2 e B.3) que demonstram que as dimensões obtidas podem variar entre cada impressão (mesmo para o mesmo objeto). Ou seja, não se observa uma repetibilidade constante do erro. Estes erros devem ser levados em conta na elaboração de desenhos futuros.

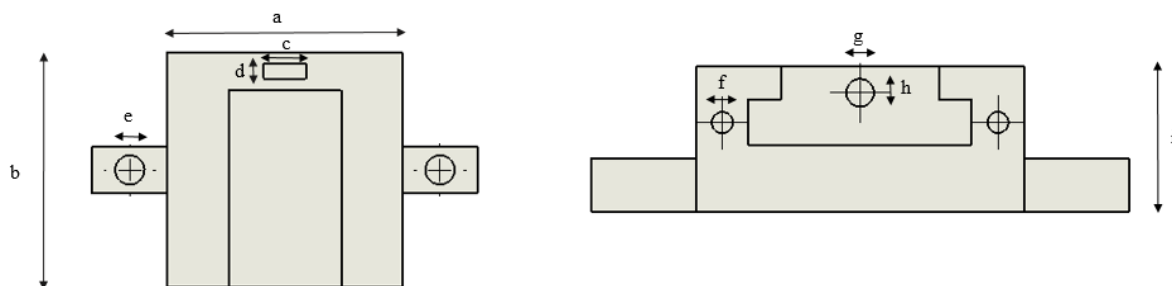


Figura 6.4 - Ilustração da peça Base - Eixo X e representação das dimensões apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Comparação entre o valor teórico e o valor medido da peça Base - Eixo X produzida em resina *standard*.

### Valores para a base do eixo X (mm)

	Valor teórico	Valor médio medido	Erro absoluto	Erro relativo	Desvio padrão
<b>a</b>	50,00	50,40	0,40	0,01	0,01
<b>b</b>	50,00	50,42	0,42	0,01	0,02
<b>c</b>	9,00	8,77	-0,23	-0,03	0,01
<b>d</b>	3,20	2,97	-0,23	-0,07	0,02
<b>e</b>	6,20	5,82	-0,38	-0,06	0,02
<b>f</b>	3,20	2,88	-0,32	-0,10	0,07
<b>g</b>	4,20	3,95	-0,25	-0,06	0,01
<b>h</b>	4,20	3,85	-0,35	-0,08	0,06
<b>i</b>	22,00	22,30	0,30	0,01	0,02

Tabela 6.2 - Comparação entre o valor teórico e o valor medido da peça Base – Eixo X produzida em PLA.

### Valores para a base do eixo X (mm)

	Valor teórico	Valor médio medido	Erro absoluto	Erro relativo	Desvio padrão
<b>a</b>	50,00	50,12	0,12	0,00	0,01
<b>b</b>	50,00	49,90	-0,10	0,00	0,06
<b>c</b>	9,00	8,91	-0,09	-0,01	0,01
<b>d</b>	3,20	3,10	-0,10	-0,03	0,01
<b>e</b>	6,20	6,00	-0,20	-0,03	0,03
<b>f</b>	3,20	3,10	-0,10	-0,03	0,06
<b>g</b>	4,20	4,10	-0,10	-0,02	0,04
<b>h</b>	4,20	3,87	-0,33	-0,08	0,07
<b>i</b>	17,00	17,02	0,02	0,00	0,02

## 6.3 Suportes finais

A última etapa desta dissertação passou por acoplar os componentes óticos aos componentes optomecânicos e implementar o sistema na mesa ótica. Ao todo o sistema é composto por três suportes de lentes, um suporte para o fotodíodo e um outro para o DMD. Ao implementar o sistema, reparou-se que a distância entre a segunda e terceira lente não podia ser os 30 mm porque os suportes sobreponham-se. Por isso, atribui-se a esta distância o valor de 100 mm. Este problema não é grave porque, como foi mencionado na página 12, os raios entre estas duas superfícies são sempre paralelos, independentemente da distância entre elas. Em todo o caso, projetou-se um suporte único com um duplo eixo Z, com uma distância de 30 mm entre as duas lentes. O desenho técnico desta peça está representado no apêndice A - Figura A.17. Os suportes finais, representados na Figura 6.6, apresentam algum desgaste devido à fricção causada pelas lixas porém, quando necessário, podem ser melhorados a nível estético, por meio de tratamento químico. O desgaste sobressai-se sobretudo nas peças de resina.

Após a implementação do sistema, projetou-se, adicionalmente, dois suportes que visam segurar cartões pretos em torno da mesa ótica (Apêndice C – Figura C.6). Os cartões pretos têm a finalidade de bloquear a luz direta do sol, que pode interferir com o feixe de luz do sistema.



Figura 6.5 – a) DMD b) Fotodíodo c) Lente com uma distância focal de 150 mm e um diâmetro de 25,4 mm.



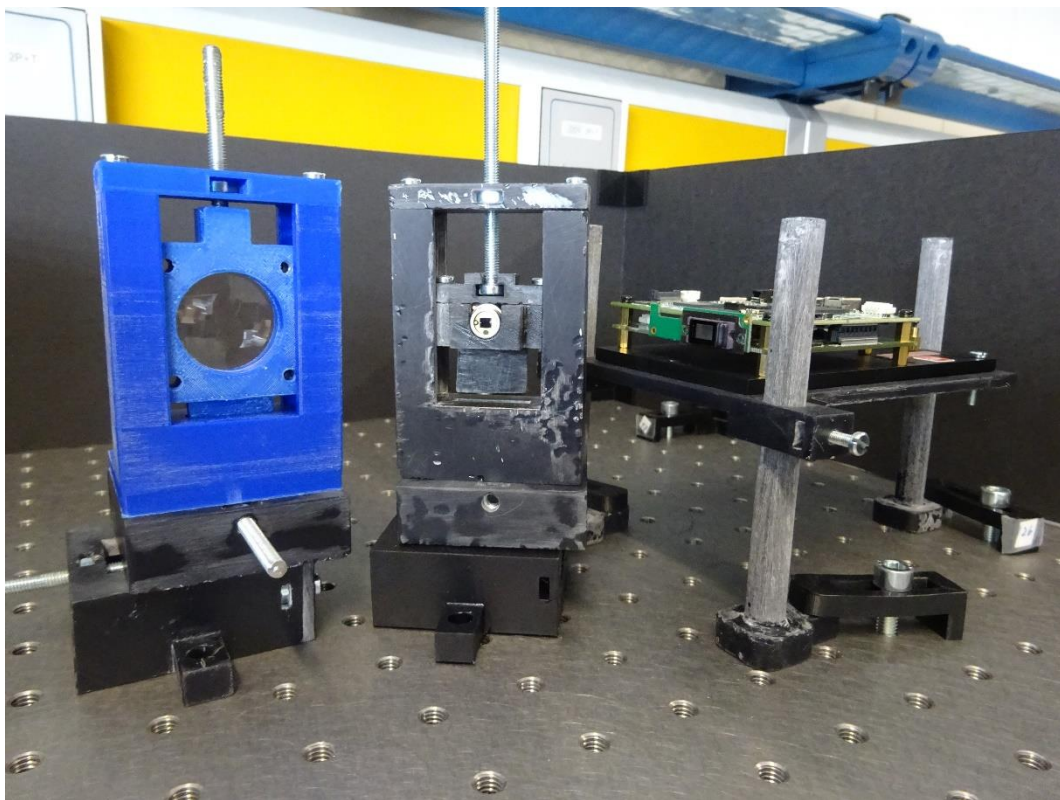


Figura 6.6 – Imagem dos componentes óticos acoplados nos respectivos suportes optomecânicos.

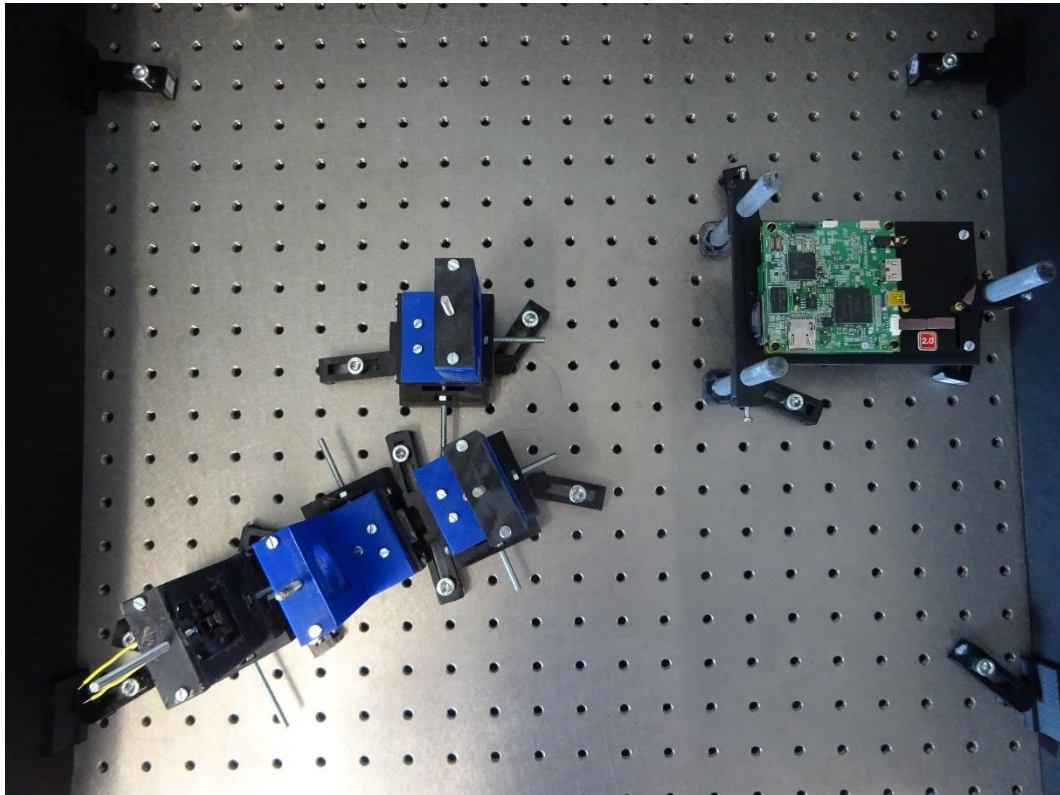


Figura 6.7 – Esquema ótico final que ilustra a simulação apresentada na Figura 3.6.

# Capítulo 7

## *Conclusão*

Esta dissertação teve como objetivos principais entender o funcionamento da teoria do CS, projetar um sistema ótico e optomecânico, e estudar as técnicas de impressão 3D que são atualmente utilizadas em instituições de investigação e na indústria. Para tal, realizou-se em primeiro lugar uma revisão de literatura sobre o funcionamento de uma SPC, e efetuou-se o *procurement* dos componentes óticos necessários para o sistema a que nos propusemos implementar. A esta etapa, seguiu-se a realização de simulações óticas no programa ZEMAX que levou à definição do subsistema ótico necessário para a câmara possuir uma abertura de campo de  $0,8^\circ$ . De seguida utilizou-se o programa SolidWorks para projetar vários modelos tridimensionais, e desenhos técnicos, de componentes optomecânicos especialmente concebidos para este protótipo. Cada modelo projetado foi simultaneamente fabricado e testado com recurso a impressoras 3D. Desta forma, foi possível relacionar as dimensões dos suportes com a resistência dos materiais ABS, PLA e resina, e estudar as técnicas de impressão SLA e FDM. Este estudo levou à conclusão de que os materiais termoplásticos são mais apropriados para aplicações mecânicas que necessitem de manuseio contínuo e que estejam sujeitos a choques frequentes. Contudo estes também apresentam alguns problemas de expansão e contração do material, tornando necessário o tratamento mecânico e químico para limar as imperfeições das peças. No entanto o próprio tratamento pode traduzir-se numa nova fonte de erros se as superfícies não ficarem totalmente uniformes. Adicionalmente, efetuou-se um estudo que relaciona o custo e o tempo de impressão de cada peça com o material utilizado, donde se inferiu a possibilidade de criar suportes constituídos por peças de diferentes materiais.

Como trabalho futuro está planeado: 1) a unificação dos três subsistemas: programação, eletrónica e ótica, de modo a testar o protótipo da SPC, 2) a adaptação de uma nova arquitetura para a câmara para que esta possa ser acoplada a um telescópio e, 3) a substituição do detetor de fótons (fotodíodo) por um detetor de outros comprimentos de onda.

A nível pessoal, esta dissertação permitiu-me contribuir para um projeto que adota uma tecnologia que pode mudar a forma com a qual os dados são adquiridos em diversas áreas do conhecimento, e em especial na Astronomia, experienciar o modo de trabalho de equipas de investigação científica, de fortalecer os meus conhecimentos em ótica e desenho técnico, e ainda de tomar contacto com tecnologia de impressão 3D, que ainda não é muito utilizada em Portugal.

## Apêndice A – Desenhos técnicos

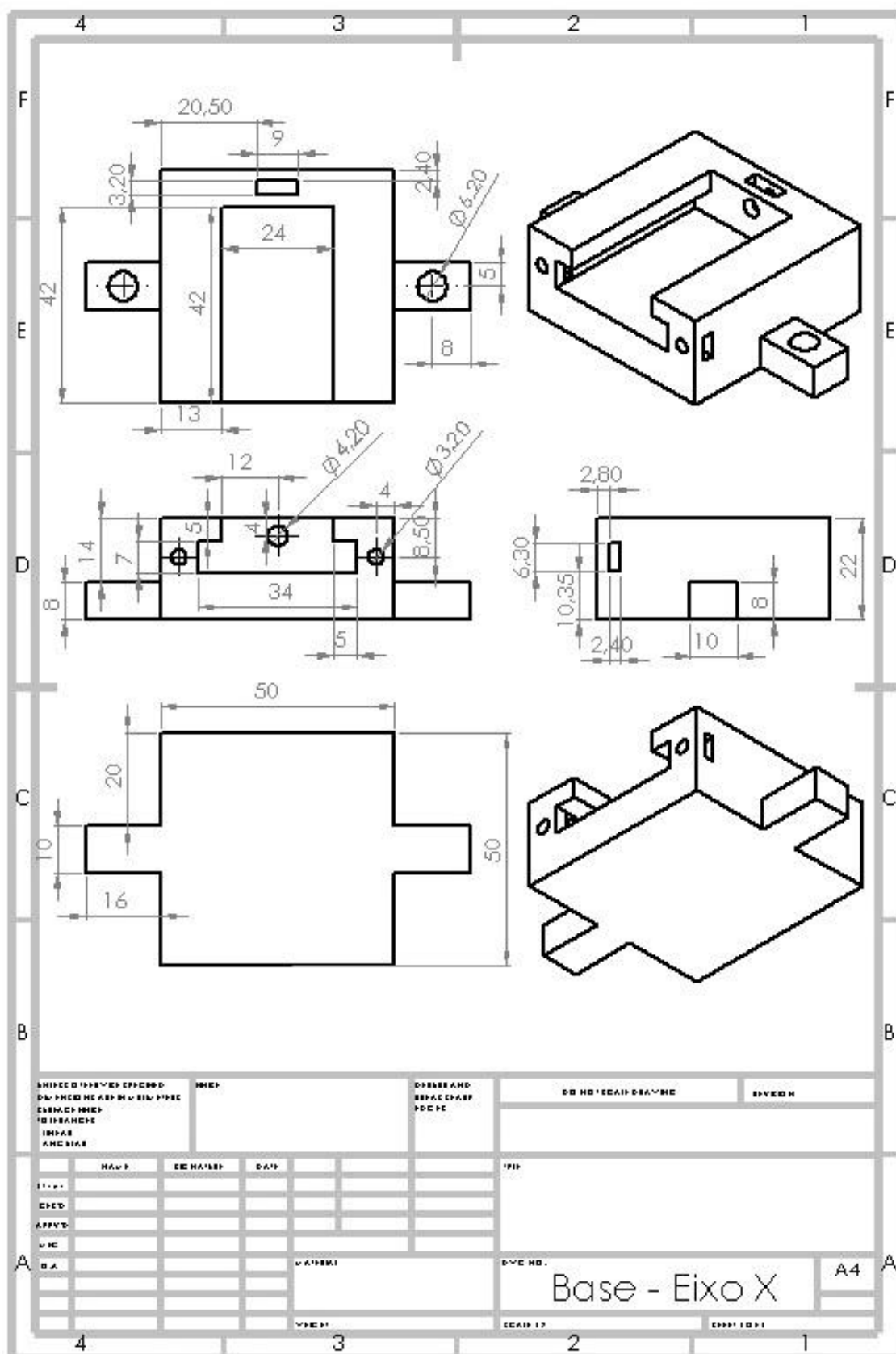


Figura A. 1 - Desenho técnico da peça Base-Eixo X.







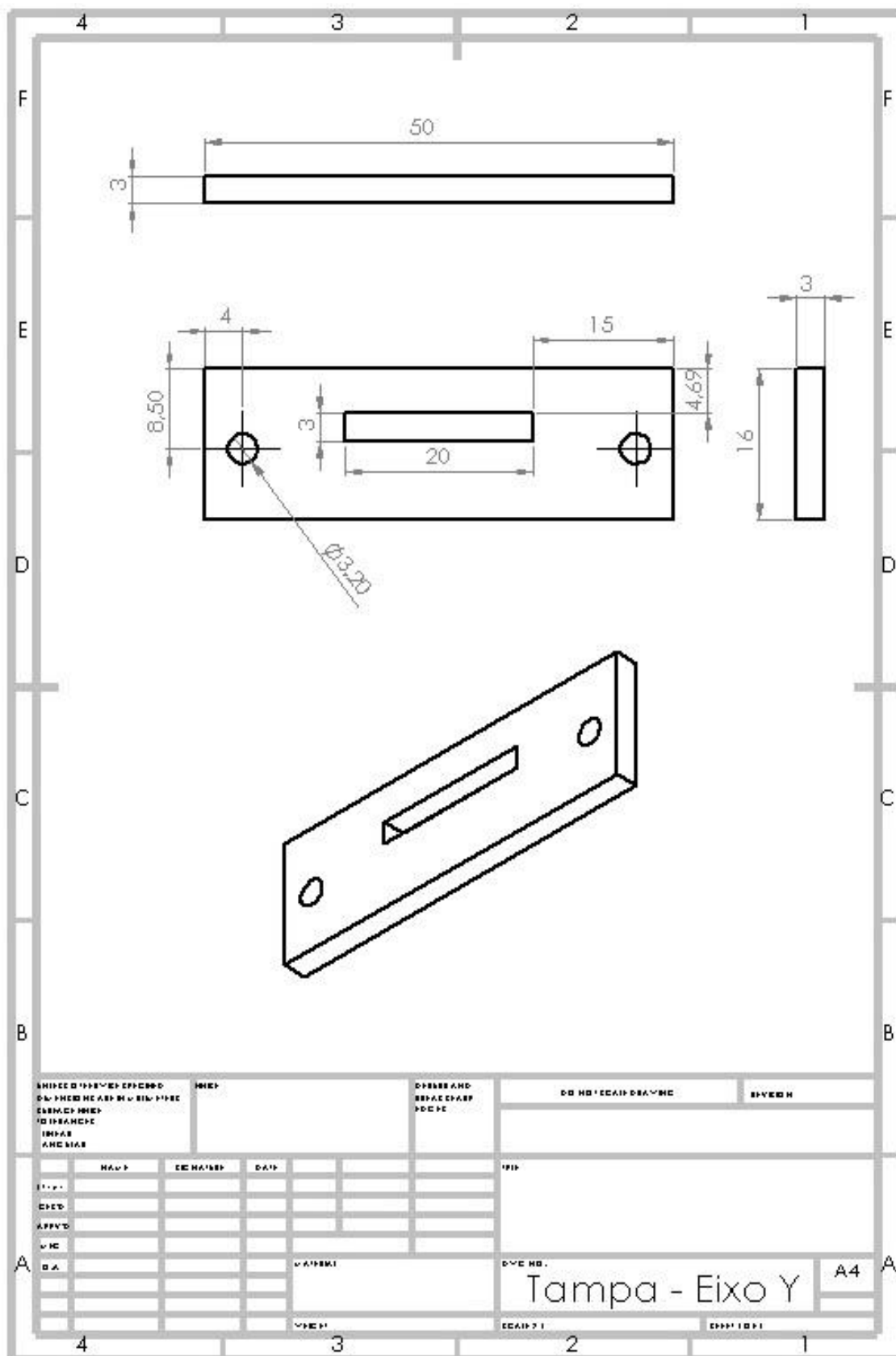


Figura A. 4 - Desenho técnico da peça Tampa - Eixo Y.

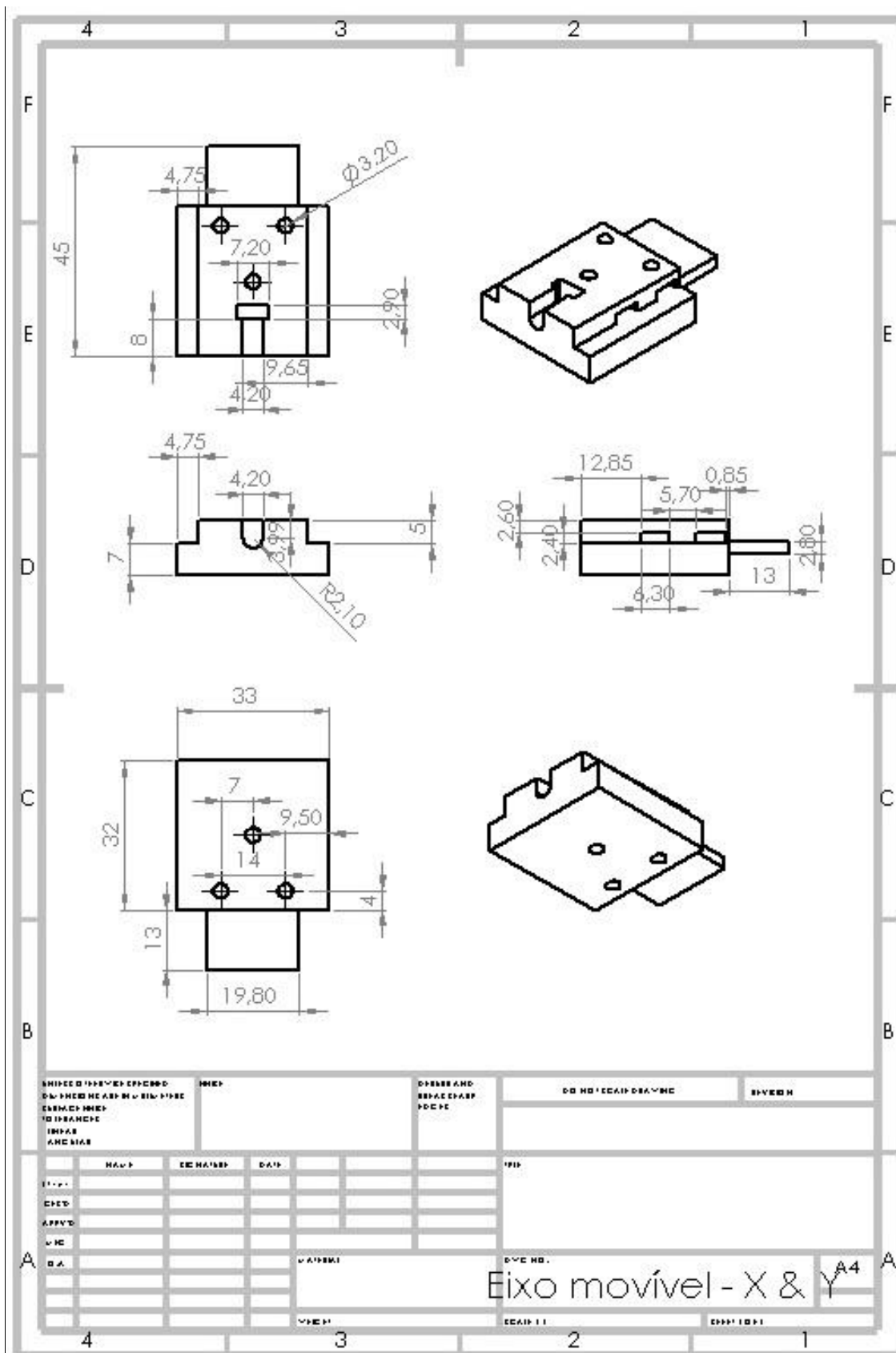


Figura A. 5 - Desenho técnico da peça Eixo móvel - X & Y.



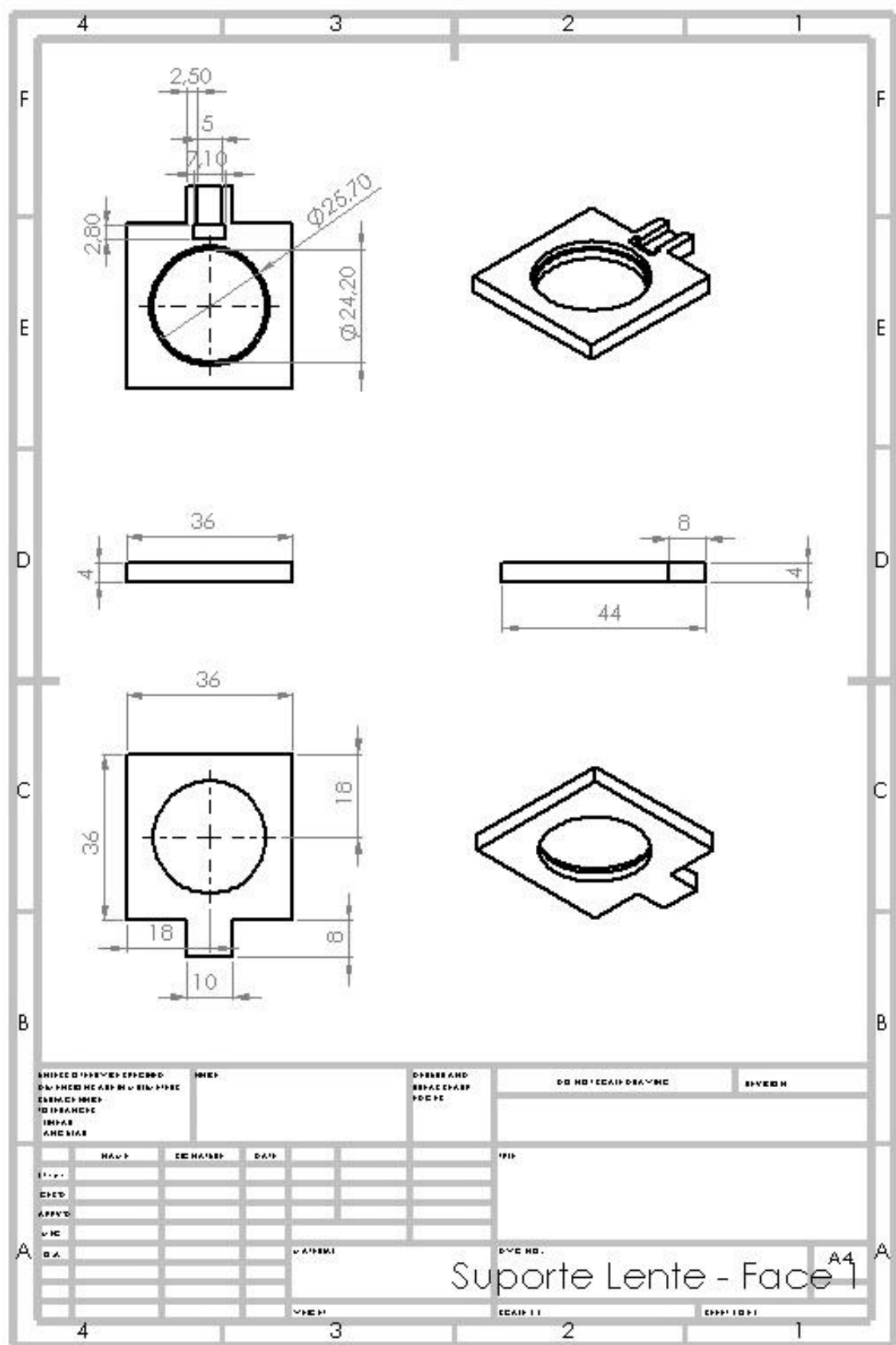


Figura A. 7 - Desenho técnico da peça Suporte Lente - Face 1

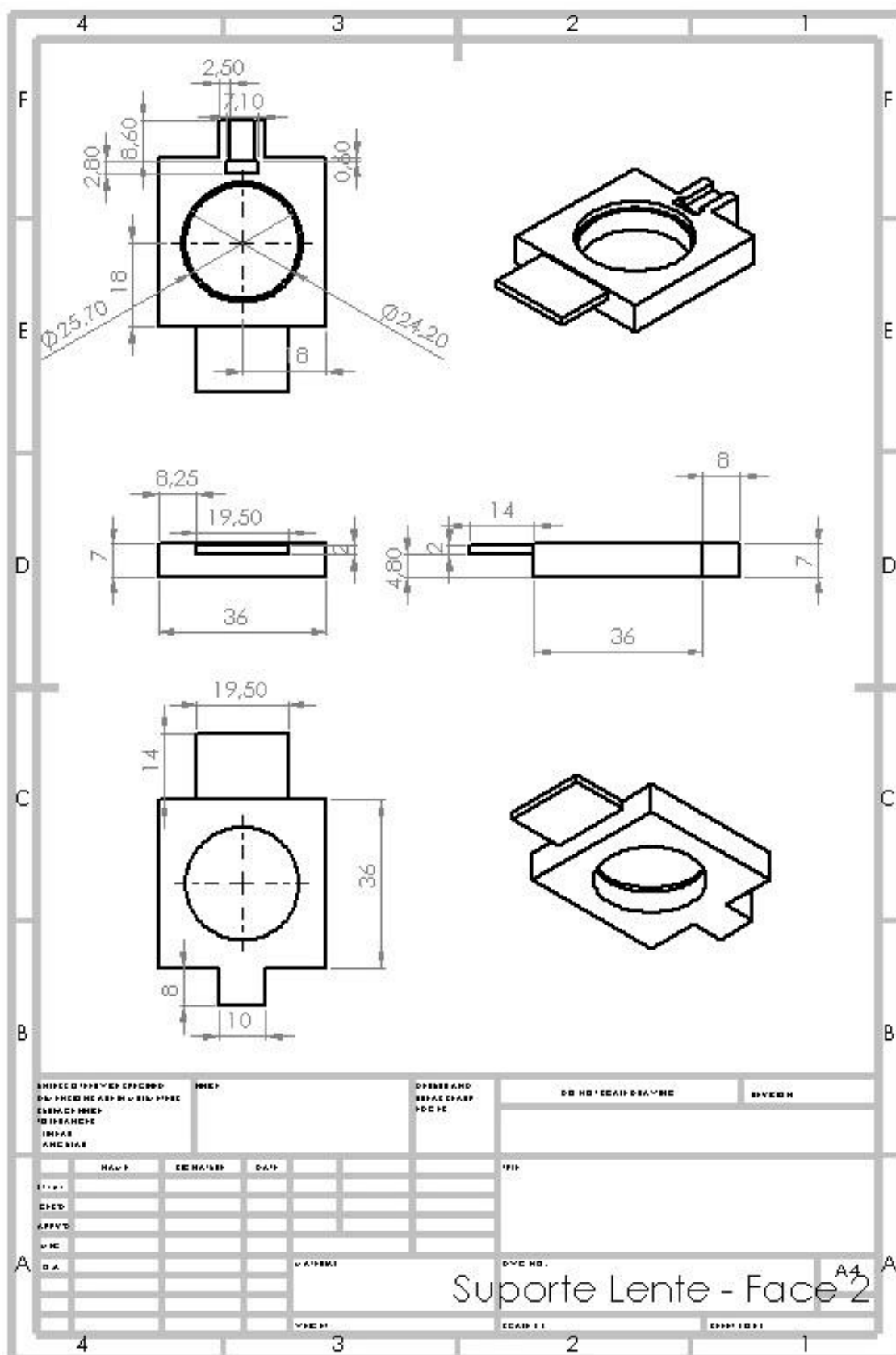


Figura A. 8 - Desenho técnico da peça Suporte Lente - Face 2

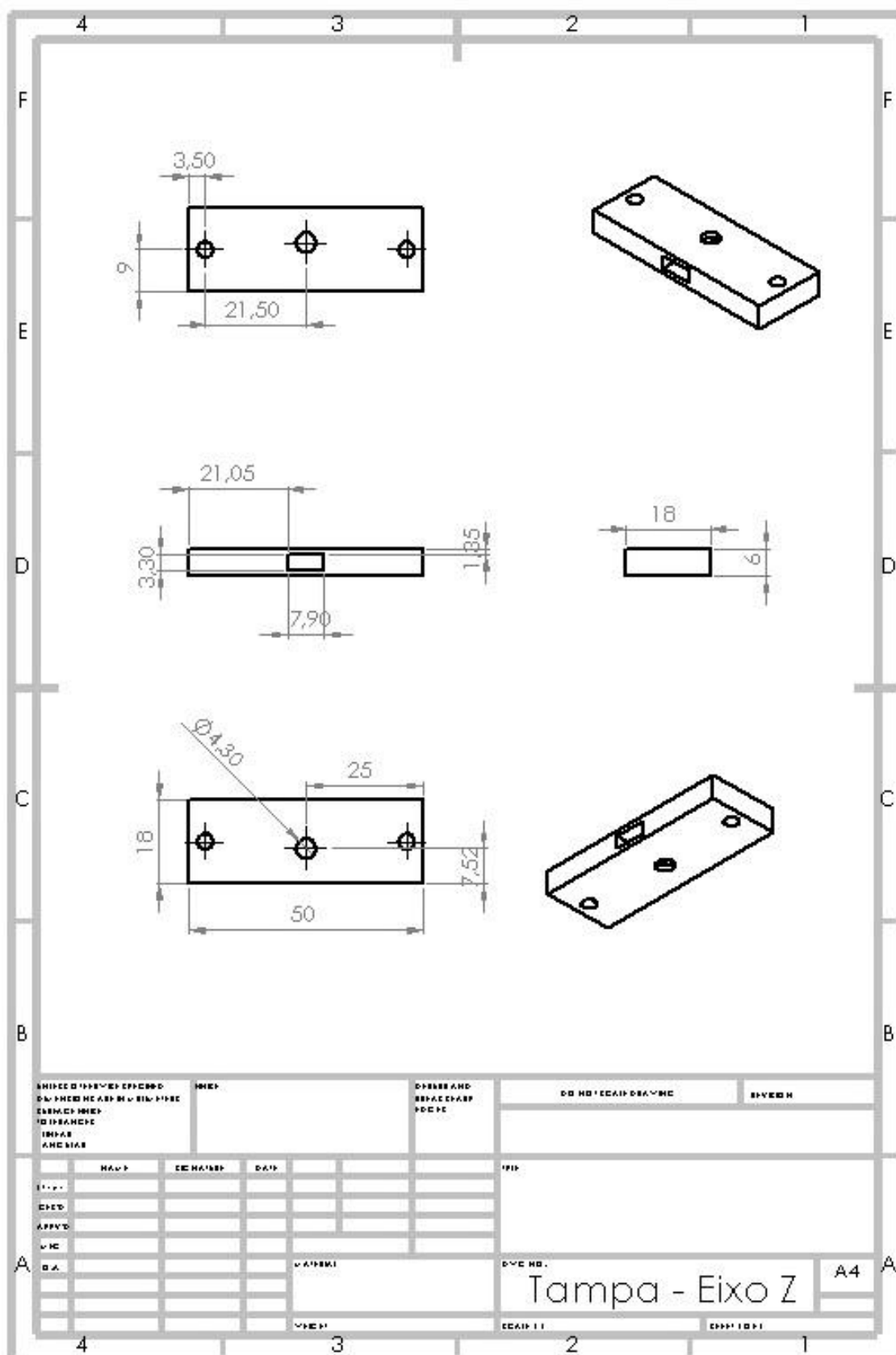


Figura A. 9 - Desenho técnico da peça Tampa - Eixo Z





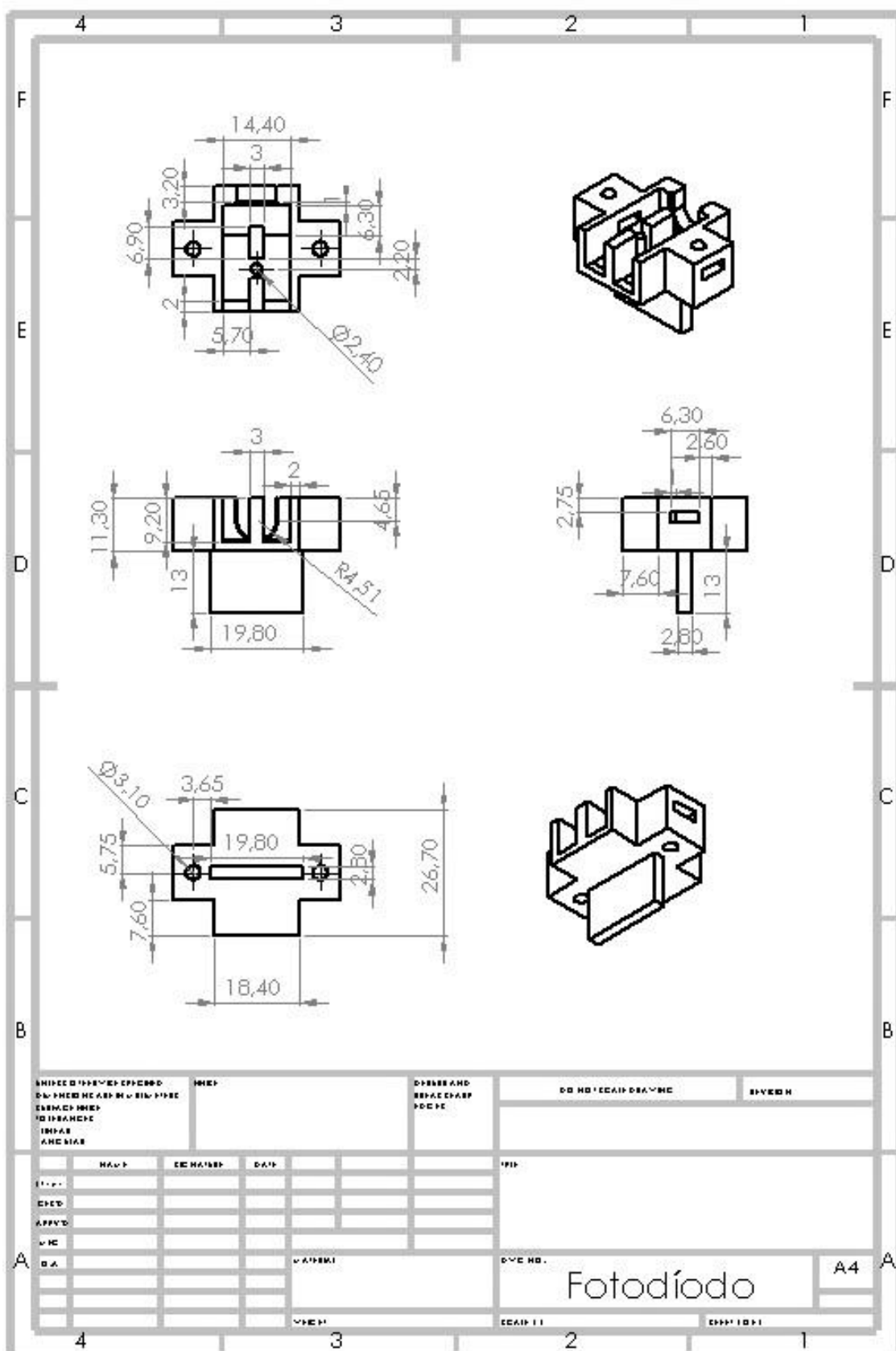


Figura A. 11 - Desenho técnico da peça Fotodíodo

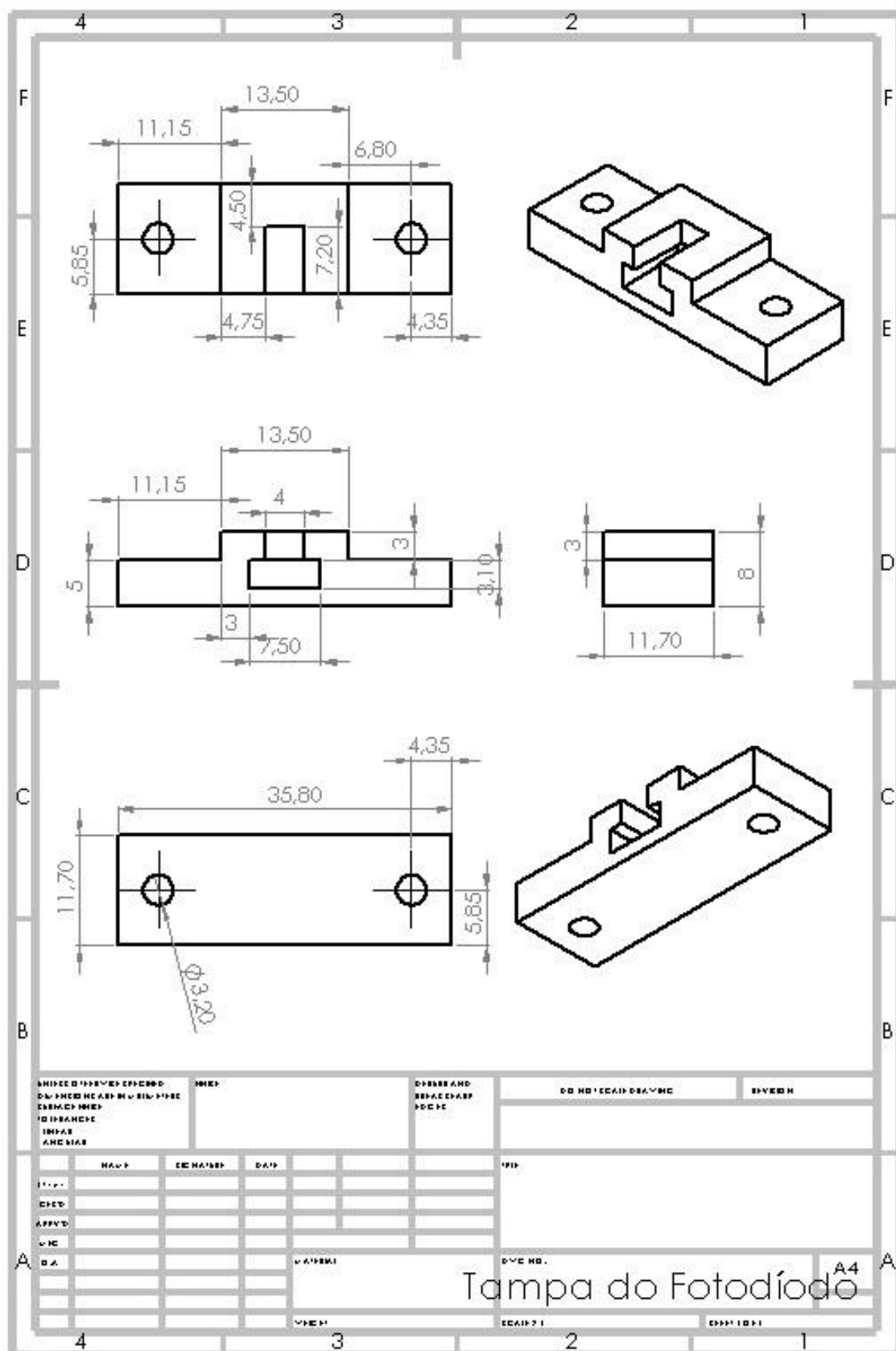


Figura A. 12 - Desenho técnico da peça Tampa do Fotodíodo





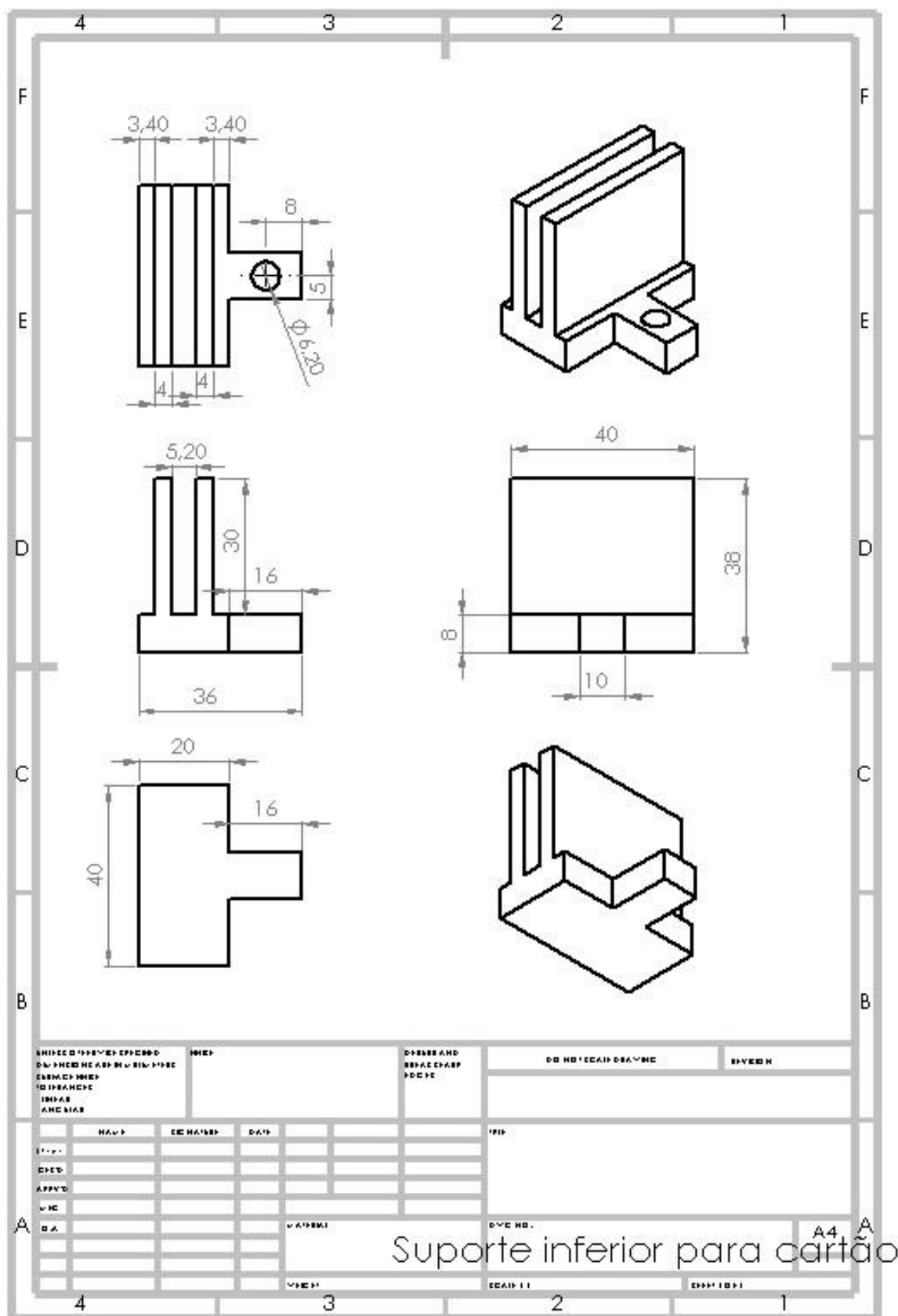


Figura A. 15 - Desenho técnico da peça Suporte inferior para cartão

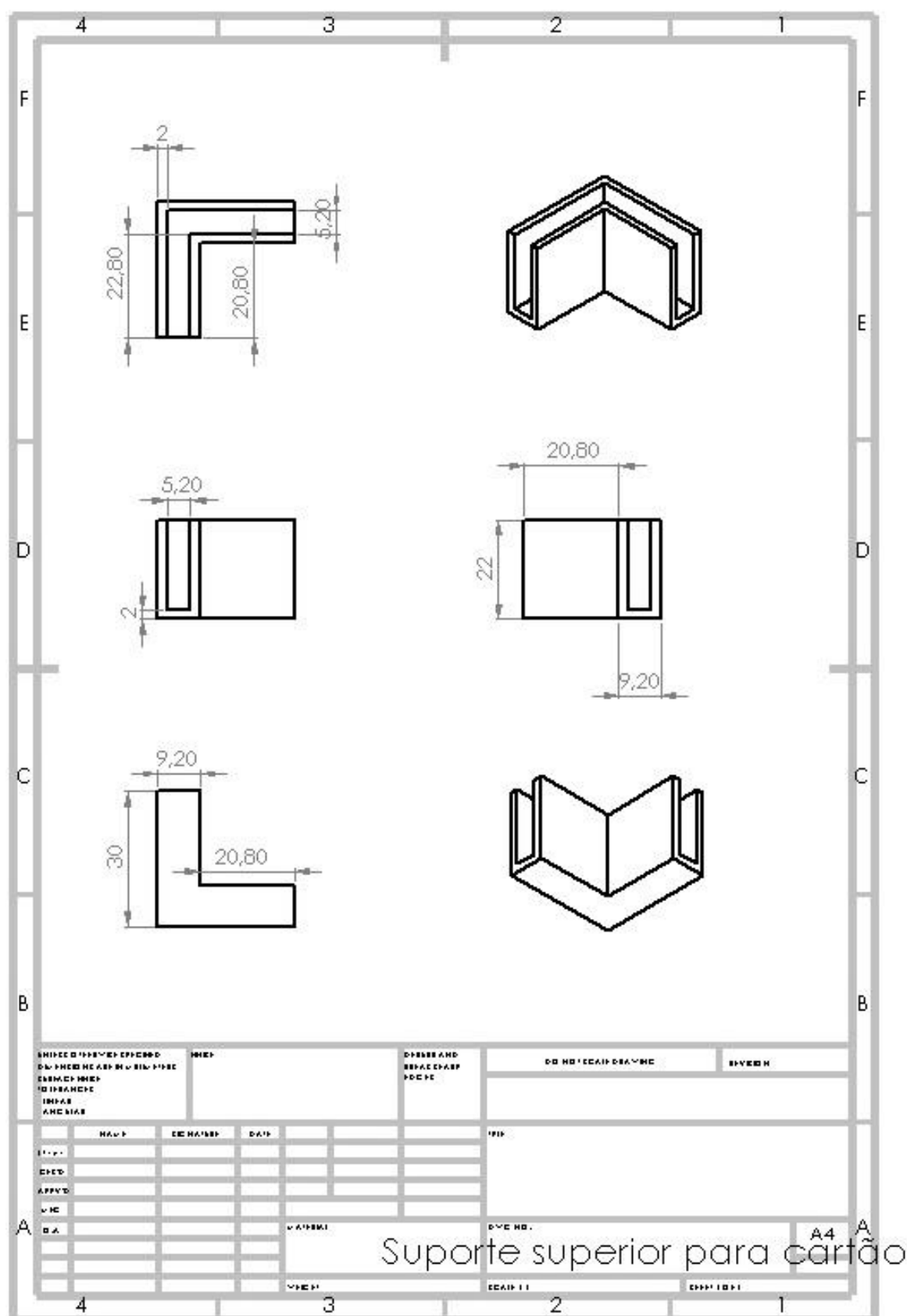


Figura A. 16 - Desenho técnico da peça Suporte superior para cartão

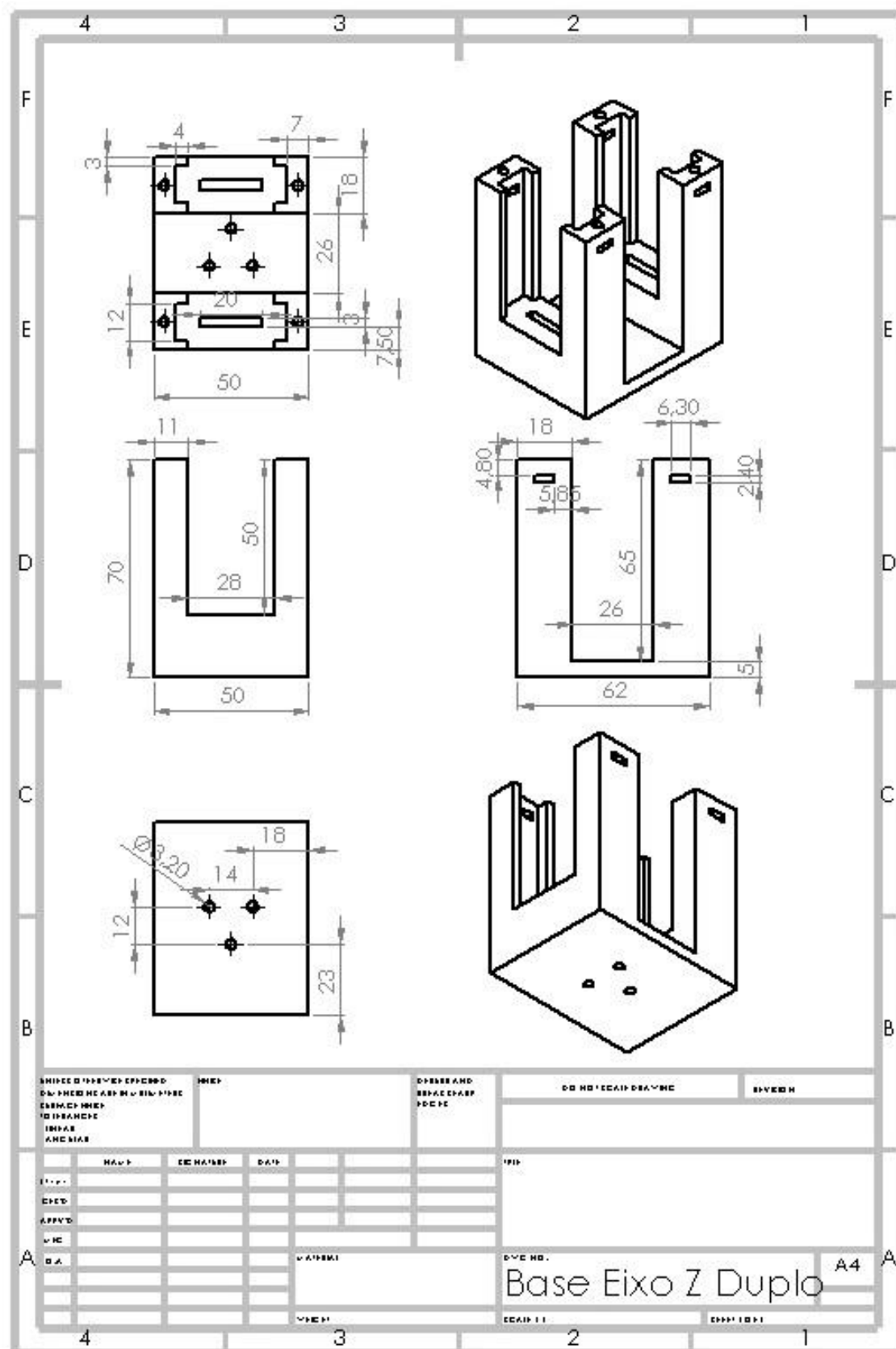


Figura A. 17 – Desenho técnico da peça Base Eixo Z (Duplo)

## Apêndice B – Medições

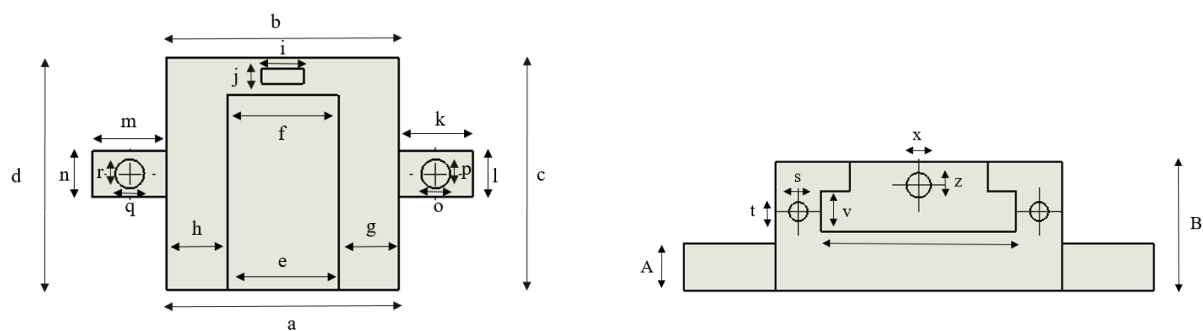


Figura B. 1 - Ilustração da peça Base - Eixo X e representação das dimensões apresentadas na Tabela B.1.

Tabela B. 1 - Tabela com os valores teóricos e valores medidos para a peça Base - Eixo X produzida com resina *standard*.

### Valores para a base do eixo X (mm)

	Valor teórico	Valor médio medido	Erro absoluto	Desvio Padrão
<b>a</b>	50,00	50,54	0,54	0,01
<b>b</b>	50,00	50,40	0,40	0,01
<b>c</b>	50,00	50,54	0,54	0,22
<b>d</b>	50,00	50,42	0,42	0,02
<b>e</b>	24,00	23,81	-0,19	0,07
<b>f</b>	24,00	23,59	-0,41	0,03
<b>g</b>	13,00	13,43	0,43	0,12
<b>h</b>	13,00	13,31	0,31	0,02
<b>i</b>	9,00	8,77	-0,23	0,01
<b>j</b>	3,20	2,97	-0,23	0,02
<b>k</b>	16,00	15,92	-0,08	0,11
<b>l</b>	10,00	10,56	0,56	0,01
<b>m</b>	16,00	16,00	0,00	0,02
<b>n</b>	10,00	10,46	0,46	0,03
<b>o</b>	6,20	5,88	-0,32	0,09
<b>p</b>	6,20	5,89	-0,31	0,01
<b>q</b>	6,20	5,82	-0,38	0,02
<b>r</b>	6,20	5,92	-0,28	0,10
<b>s</b>	3,20	2,88	-0,32	0,07
<b>t</b>	3,20	2,90	-0,30	0,05
<b>u</b>	34,00	33,68	-0,32	0,18
<b>v</b>	7,00	6,55	-0,45	0,03
<b>x</b>	4,20	3,95	-0,25	0,01
<b>z</b>	4,20	3,85	-0,35	0,06
<b>A</b>	8,00	7,90	-0,10	0,01
<b>B</b>	22,00	22,30	0,30	0,02



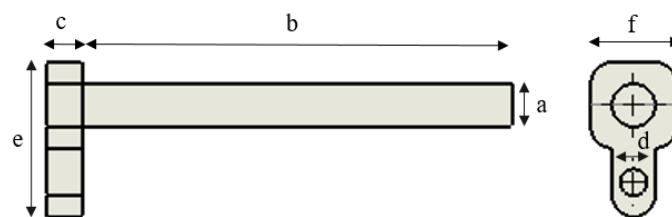


Figura B. 2 - Ilustração da peça Poste e representação das dimensões apresentadas nas tabelas B.2 e B.3.

Tabela B. 2 - Tabela com os valores teóricos e valores medidos para a peça Poste nº1 produzida com resina *standard*.

### Valores para o poste nº1 (mm)

	Valor teórico	Valor médio medido	Erro absoluto	Erro relativo	Desvio padrão
<b>a</b>	10,00	9,92	-0,08	-0,01	0,03
<b>b</b>	100,00	100,11	0,11	0,00	0,04
<b>c</b>	8,00	8,77	0,77	0,10	0,10
<b>d</b>	6,20	5,79	-0,41	-0,07	0,17
<b>e</b>	36,00	37,00	1,00	0,03	0,14
<b>f</b>	20,00	19,99	-0,01	0,00	0,07

Tabela B. 3 - Tabela com os valores teóricos e valores medidos para a peça Poste nº2 produzida com resina *standard*.

### Valores para o poste nº2 (mm)

	Valor teórico	Valor médio medido	Erro absoluto	Erro relativo	Desvio padrão
<b>a</b>	10,00	10,71	0,71	0,07	0,23
<b>b</b>	100,00	100,44	0,44	0,00	0,03
<b>c</b>	8,00	8,66	0,66	0,08	0,01
<b>d</b>	6,20	5,85	-0,35	-0,06	0,05
<b>e</b>	36,00	35,98	-0,02	0,00	0,17
<b>f</b>	20,00	20,48	0,48	0,02	0,02

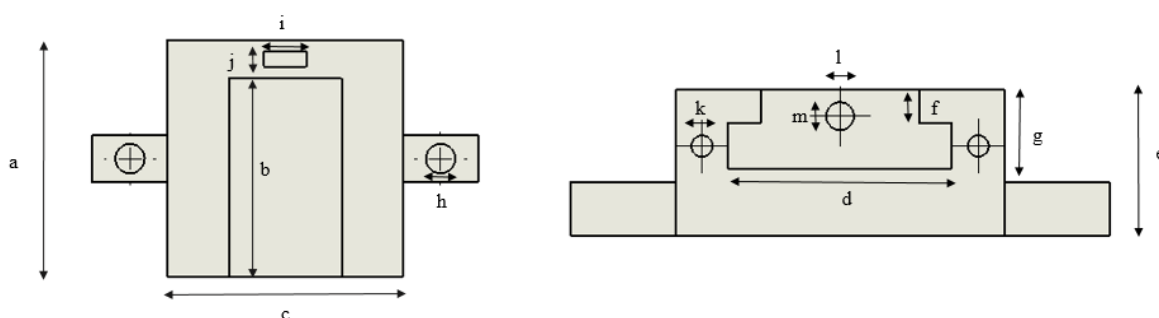


Figura B. 3 - Ilustração da peça Base - Eixo X e representação das dimensões apresentadas na Tabela B.4.

Tabela B. 4 - Tabela com os valores teóricos e valores medidos para a peça Base – Eixo X produzido com PLA.

### Valores para a base do eixo X (mm)

	Valor teórico	Valor médio medido	Erro absoluto	Erro relativo	Desvio padrão
<b>a</b>	50,00	49,90	-0,10	0,00	0,06
<b>b</b>	42,00	41,64	-0,36	-0,01	0,26
<b>c</b>	50,00	50,12	0,12	0,00	0,01
<b>d</b>	30,00	29,96	-0,04	0,00	0,01
<b>e</b>	17,00	17,02	0,02	0,00	0,02
<b>f</b>	5,00	5,08	0,08	0,02	0,03
<b>g</b>	12,00	11,92	-0,08	-0,01	0,18
<b>h</b>	6,20	6,00	-0,20	-0,03	0,03
<b>i</b>	9,00	8,91	-0,09	-0,01	0,01
<b>j</b>	3,20	3,10	-0,10	-0,03	0,01
<b>k</b>	3,20	3,10	-0,10	-0,03	0,06
<b>l</b>	4,20	4,10	-0,10	-0,02	0,04
<b>m</b>	4,20	3,87	-0,33	-0,08	0,07

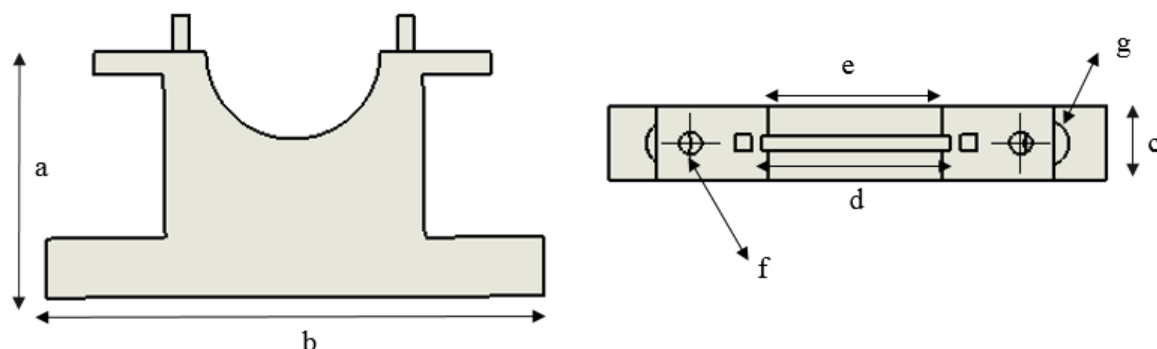


Figura B. 4 - Ilustração da parte inferior de um suporte de lentes e representação das dimensões apresentadas na Tabela B.5.

Tabela B. 5 - Tabela com os valores teóricos e valores medidos da parte inferior de um suporte de lentes produzido com ABS.

### Valores para suporte estático (mm)

	Valor teórico	Valor médio medido	Erro absoluto	Erro relativo	Desvio padrão
<b>a</b>	33,00	32,93	-0,07	0,00	0,01
<b>b</b>	66,89	66,62	-0,27	0,00	0,09
<b>c</b>	10,20	10,31	0,11	0,01	0,00
<b>d</b>	25,60	24,99	-0,61	-0,02	0,26
<b>e</b>	23,40	23,17	-0,23	-0,01	0,03
<b>f</b>	3,20	2,91	-0,29	-0,09	0,04
<b>g</b>	6,20	6,02	-0,18	-0,03	0,06

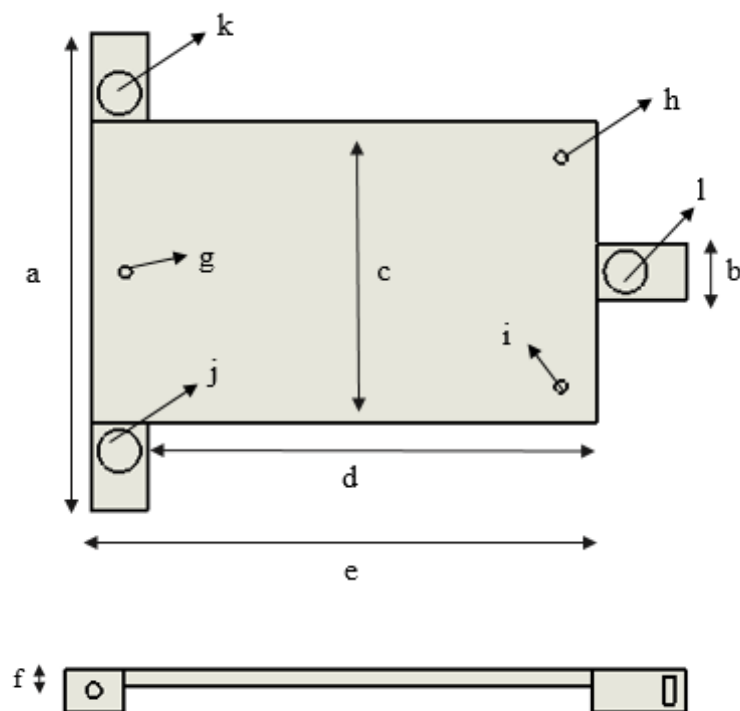


Figura B. 5 - Ilustração da parte inferior de um suporte de lentes e representação das dimensões apresentadas na Tabela B.6.

Tabela B. 6 - Tabela com os valores teóricos e valores medidos para a peça Placa do DMD produzida com resina standard.

### Valores para a placa do DMD (mm)

	Valor teórico	Valor médio medido	Erro absoluto	Erro relativo	Desvio padrão
<b>a</b>	119,00	118,77	-0,23	0,00	0,06
<b>b</b>	14,00	14,14	0,14	0,01	0,01
<b>c</b>	75,00	74,68	-0,32	0,00	0,02
<b>d</b>	125,50	126,24	0,74	0,01	0,07
<b>e</b>	147,50	148,33	0,83	0,01	0,04
<b>f</b>	4,00	4,47	0,47	0,12	0,06
<b>g</b>	3,50	2,75	-0,75	-0,21	0,01
<b>h</b>	3,50	2,76	-0,74	-0,21	0,00
<b>i</b>	3,50	2,80	-0,70	-0,20	0,02
<b>j</b>	10,50	9,96	-0,54	-0,05	0,05
<b>k</b>	10,50	9,91	-0,59	-0,06	0,02
<b>l</b>	10,50	10,03	-0,47	-0,04	0,09

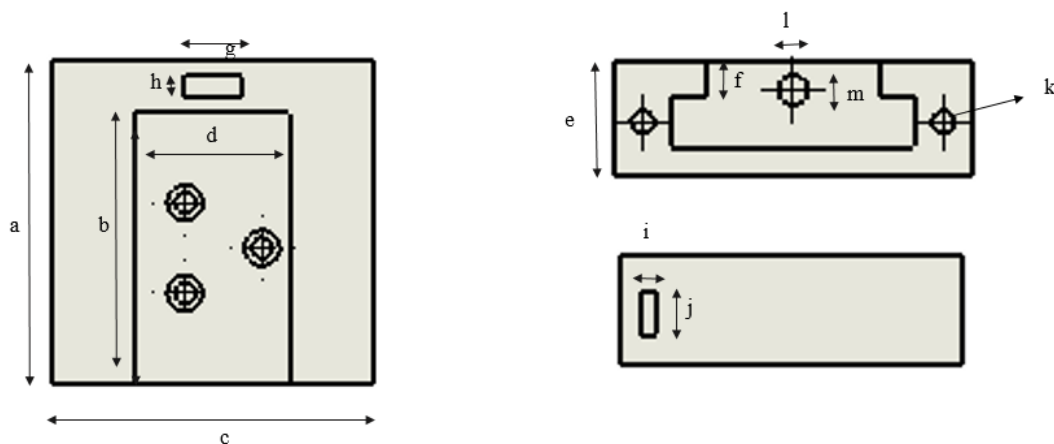


Figura B. 6 - Ilustração da peça Base - Eixo Y e representação das dimensões apresentadas na Tabela B.7.

Tabela B. 7 - Tabela com os valores teóricos e valores medidos para a peça Base – Eixo Y produzido com PLA.

### Valores para a base do eixo Y (mm)

	Valor teórico	Valor médio medido	Erro absoluto	Erro relativo	Desvio padrão
<b>a</b>	50,00	49,81	-0,19	0,00	0,05
<b>b</b>	42,00	42,11	0,11	0,00	0,11
<b>c</b>	50,00	49,90	-0,10	0,00	0,24
<b>d</b>	30,00	29,99	-0,01	0,00	0,04
<b>e</b>	17,00	17,00	0,00	0,00	0,00
<b>f</b>	5,00	5,06	0,06	0,01	0,04
<b>g</b>	9,00	8,94	-0,06	-0,01	0,02
<b>h</b>	3,20	3,10	-0,10	-0,03	0,01
<b>i</b>	6,30	6,05	-0,25	-0,04	0,01
<b>j</b>	2,60	2,47	-0,13	-0,05	0,01
<b>k</b>	3,20	3,02	-0,18	-0,06	0,05
<b>l</b>	4,20	4,11	-0,09	-0,02	0,28
<b>m</b>	4,20	3,90	-0,30	-0,07	0,11

## Apêndice C – Imagens

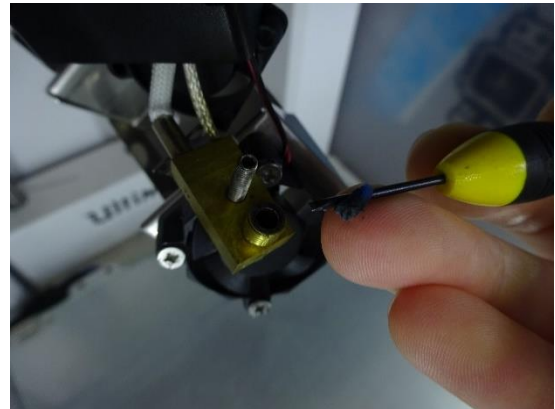
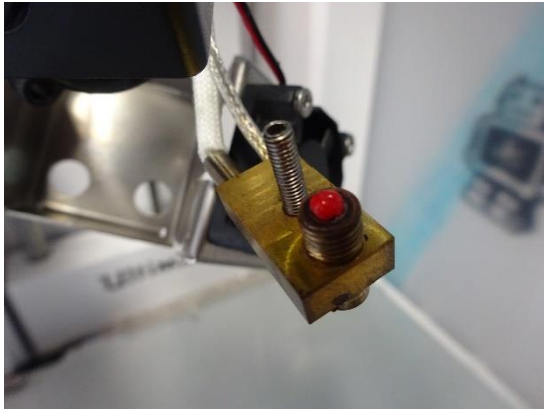


Figura C. 1 - a) Obstrução do bico de impressão (*nozzle*) da impressora Ultimaker 2. b) Limpeza do *nozzle*.

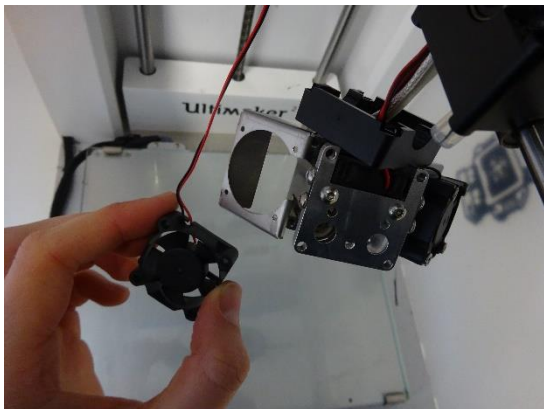


Figura C. 2 – a) Substituição de uma ventoinha lateral da cabeça de impressão da Ultimaker 2. b) Aquisição de um novo *kit* do *nozzle*.

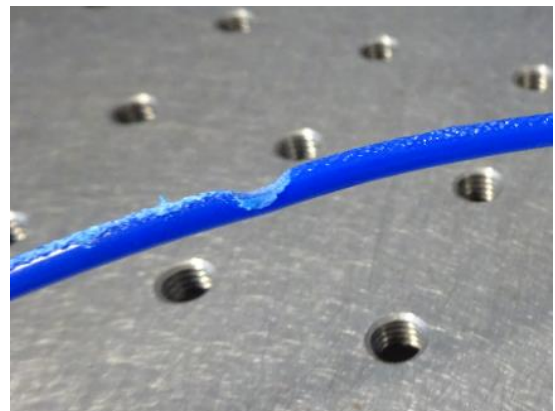
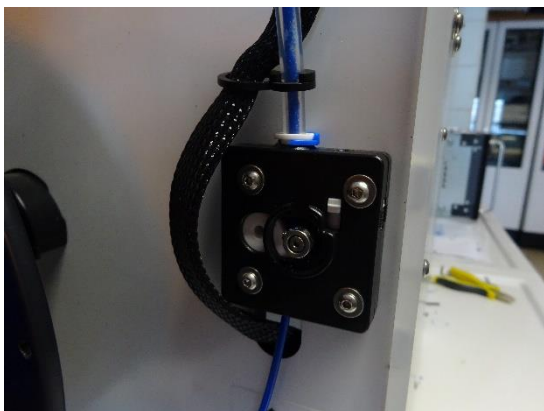


Figura C. 3 - a) Motor de passo que empurra o filamento de plástico na Ultimaker 2. b) Desgaste do filamento de plástico.

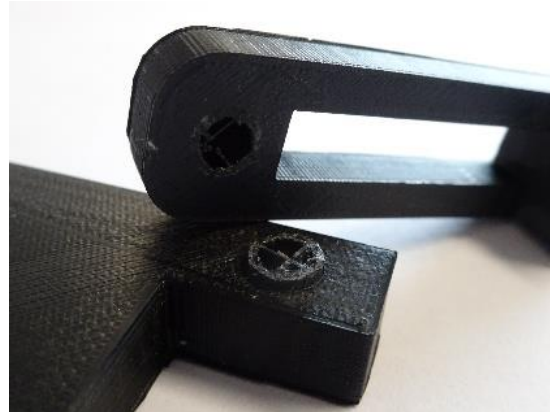
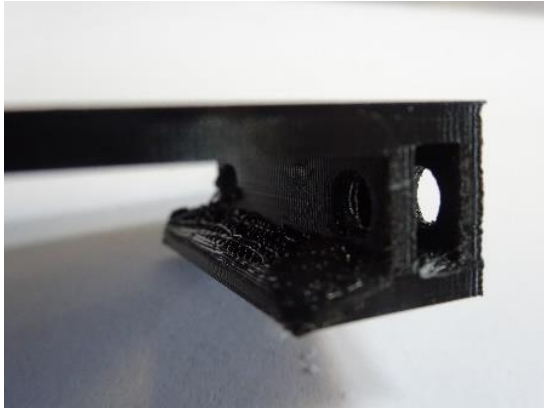


Figura C. 4 - a) Efeito dos suportes de PLA na zona da calha. b) Efeito de uma baixa densidade de preenchimento dos suportes produzidos em PLA.



Figura C. 5 - a) Efeito dos suportes e dos resíduos extra de resina. b) Peça fabricada em resina que quebrou após choque.

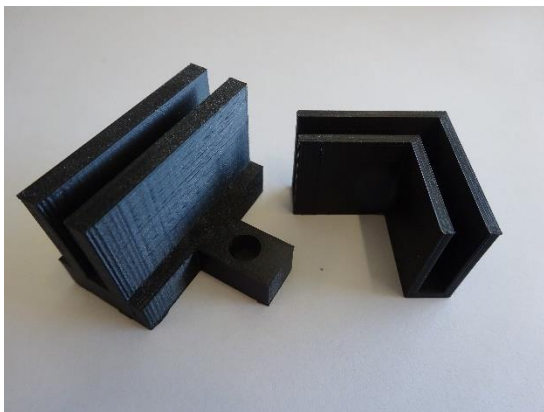


Figura C. 6 – a) Suporte inferior e superior para cartões. b) Lente de 25,4 mm de diâmetro.

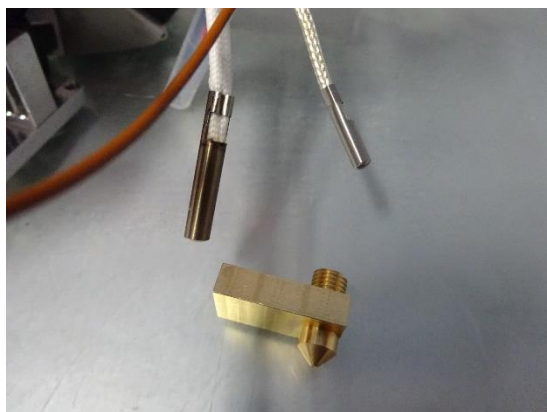


Figura C. 7 - a) Substituição do sensor de temperatura da Ultimaker 2. b) Bolha de nível utilizada para nivelar o suporte do DMD.

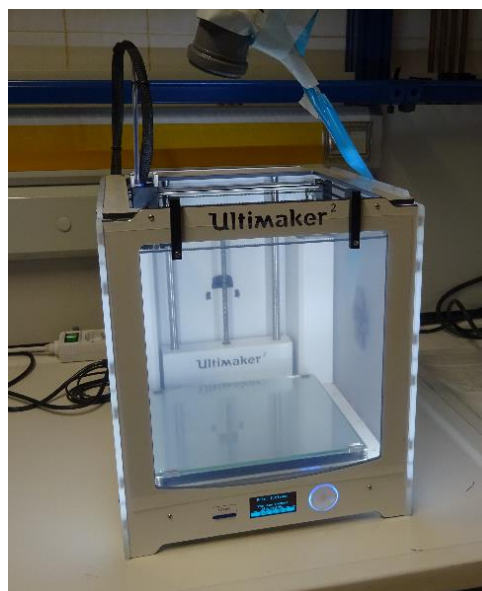
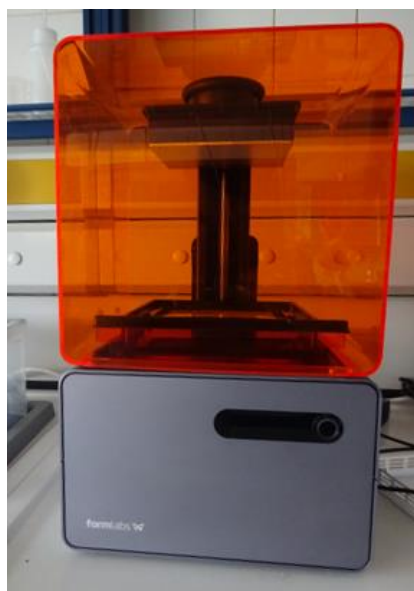


Figura C. 8 - a) Impressora Form 1+. b) Impressora Ultimaker 2+ com tampa produzida no laboratório.



## Referências

- [1] André Jorge de Oliveira. Revista Galileu. <http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/Espaco/noticia/2015/01/hubble-tira-maior-e-mais-precisa-foto-da-galaxia-de-andromeda.html>. Consultado em Agt 2016.
- [2] Dana Mackenzie. Compressed Sensing Makes Every Pixel Count. What's Happening in the Mathematical Sciences, AMS, Volume 7 (114-127). 2009.
- [3] How to obtain a 3D view of a whole galaxy in one shot. ESO. <https://www.eso.org/public/teles-instr/technology/ifu/>. Consultado em Set 2016.
- [4] Escolha e dimensão do tubo. [http://www.observatorio-phoenix.org/j\\_tele/j\\_13\\_1.htm](http://www.observatorio-phoenix.org/j_tele/j_13_1.htm). Consultado em Set 2016.
- [5] Amostragem de Sinais. FEUP. <http://paginas.fe.up.pt/~sam/Tele2/apontamentos/Amostragens.pdf>. Consultado em Jun 2016.
- [6] Richard Baraniuk. Compressive Sensing. IEEE Signal Processing Magazine, pag 118. Jul 2007.
- [7] <http://www.web.me.iastate.edu/sbhattac/Images/cs.png>. Consultado em Set 2016.
- [8] André Luiz Pilastrri. Compressive Sensing in Medical Imaging. Programa Doutoral em Engenharia Informática. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Set 2015.
- [9] Marco F. Duarte, Mark A. Davenport, Dharmpal Takhar, Jason N. Laska, Ting Sun, Kevin F. Kelly, and Richard G. Baraniuk. Single-Pixel Imaging via Compressive Sampling. IEEE Signal Processing Magazine, pag 83. Mar 2008.
- [10] V.Duran, F Soldevila, E. Irls, P. Clemente, E. Tajauerce, P. Andrés and J.Lancis. Imaging at depth in tissue with a Single-Pixel Camera. arXiv:1411.2731[physics.optics]. Nov 2014.
- [11] Datasheet DLP 0.3 WVGA Series 220 DMD. Texas Instruments. Oct. 2012.
- [12] CMOS Compatible Fabrication Processes for Digital Micromirror Device. Cuiling Gong and Tim Hogan. IEEE Journal of Electron Devices Society. Vol 2, No 3. May 2014.
- [13] Raquel Bandarra Borges. Electronics Design and Implementation of a Compressed Sensing Instrument for Astronomy. Dissertação de Mestrado em Engenharia Física. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Set 2015.
- [14] Hamamatsu. <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/alpha/P/4103/S1223-01/index.html>. Consultado em Set 2016.
- [15] Datasheet Si PIN photodiodes S1223 series. Hamamatsu. 2013.
- [16] Bráulio de Albuquerque. Uma visão Geral do ZEMAX: Um programa de modelagem e simulação de sistemas ópticos. INPE-14106-RPQ/807. 2006.
- [17] Darryl Meister. Methods for Estimating Lens Thickness. SOLA Technical Marketing Vol. 26, No.201 Aug. 1997.
- [18] Schoolphysics. [http://www.schoolphysics.co.uk/age16-19/Optics/Reflection/text/Reflection\\_/index.html](http://www.schoolphysics.co.uk/age16-19/Optics/Reflection/text/Reflection_/index.html). Consultado em Set 2016.



- [20] SolidWorks. <http://www.solidworks.com>. Consultado em Set 2016.
- [21] Chenlong Zhang, Nicholas C. Anzalone, Rodrigo P. Faria and Joshua M. Pearce. Open-Source 3D-Printable Optics Equipment. PLoS ONE 8(3): e59840. Mar 2013.
- [22] Optomechanics with LEGO. F.Quercioli, B. Tiribilli, A.Mannoni and S. Acciai.. Applied Optics Vol 37, No 16. Jun 1998.
- [23] Thorlabs. <https://www.thorlabs.com/>. Consultado em Set 2016.
- [24] History of 3D Printing. <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/>. Consultado em Set. 2016.
- [25] Gerald C. Anzalone, Chenlong Zhang, Bas Wijnen, Paul G. Sanders and Joshua M. Pearce. A Low-Cost Open-Source Metal 3-D-Printer. IEE. Volume 1. Digital Object Identifier 10.1109/Access.2013.2293018. Dez 2013.
- [26] Types of 3D printers or 3D printing technologies overview. 3D Printing from scratch. <http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/#slm>. Consultado em Set 2016.
- [27] How to prepare STL Files. Stratasys. <https://www.stratasysdirect.com/resources/how-to-prepare-stl-files/>. Consultado em Jun 2016.
- [28] The future of 3-D printing: Moving beyond prototyping to finished products. PwC Technology Forecast. MW-15-0532 JP 2014.
- [29] Bertalan Meskó. 12 Things we can 3D print in medicine right now. <https://3dprintingindustry.com/news/12-things-we-can-3d-print-in-medicine-right-now-42867/>. Consultado em Set 2016.
- [30] ESA. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Engineering\\_Technology/Building\\_a\\_lunar\\_base\\_with\\_3D\\_printing](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing). Consultado em Sep 2016.
- [31] BBC. <http://www.bbc.com/news/science-environment-35983735>. Consultado em Set 2016.
- [32] Scott J Grunewald. 3D Printer sales are expected to double in 2016, reach 5.6 million units sold by 2019. <https://3dprint.com/98653/3d-printer-sales-double-2016/>. Consultado em Set. 2016.
- [33] Ultimaker. <https://ultimaker.com>. Consultado em Set 2016.
- [34] Formlabs. <http://formlabs.com/3d-printers/form-1-plus/>. Consulato em Set. 2016.
- [35] Domain Group 3D Printing Workshop Notes . <https://education.gov.mt/en/resources/News/Documents/Youth%20Guarantee/3D%20Printing.pdf>. Consultado em Set 2016.
- [36] Ultimaker. <https://ultimaker.com/en/products/cura-software>. Consultado em Set 2016.
- [37] Amazinaws. [https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/prod.ultimaker.com/download/materials/Ultimaker-ABS-\(TDS\).pdf](https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/prod.ultimaker.com/download/materials/Ultimaker-ABS-(TDS).pdf). Consultado em Set 2016.
- [38] Digital Trends. <http://www.digitaltrends.com/cool-tech/abs-vs-pla-3d-printing-materials-comparison/#:NhcrRfbJvkm1A>. Consultado em Jun 2016.
- [39] Amazinaws. [https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/prod.ultimaker.com/download/materials/Ultimaker-PLA-\(TDS\).pdf](https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/prod.ultimaker.com/download/materials/Ultimaker-PLA-(TDS).pdf). Consultado em Set 2016.

- [40] ProtoParadigm. <http://www.protoparadigm.com/news-updates/the-difference-between-abs-and-pla-for-3d-printing/>. Consultado em Jun 2016.
- [41] Make: <http://makezine.com/2014/11/11/abs-or-pla-choosing-the-right-filament/>. Consultado em Jun 2016.
- [42] Ultimaker. <https://ultimaker.com/en/resources/19537-warping>. Consultado em Set 2016.
- [43] Ultimaker. <https://ultimaker.com/en/resources/19503-pillowing>. Consultado em Set 2016.
- [44] Ultimaker. <https://ultimaker.com/en/resources/21477-how-to-fix-under-extrusion>. Consultado em Set 2016.
- [45] Formlabs. <http://formlabs.com/tools/preform/>. Consultado em Set 2016.
- [46] Formlabs. <http://formlabs.com/support/software/start-good-stl-or-obj/>. Consultado em Set 2016.
- [47] Formlabs. <http://formlabs.com/support/software/what-supports-do/>. Consultado em Set 2016.
- [48] Wishbox. <http://blog.wishbox.net.br/2016/05/26/impressora-3d-sla-como-funciona/>. Consultado em Set 2016.
- [49] 3d Systems. <https://www.3dsystems.com/resources/information-guides/stereolithography/sla>. Consultado em Set 2016.
- [50] Formlabs. <http://formlabs.com/store/eu/form-1/buy-materials/>. Consultado em Set 2016.
- [51] Formlabs. <http://formlabs.com/materials/standard/>. Consultado em Set 2016.
- [52] Formlabs. <http://formlabs.com/materials/tough/>. Consultado em Set 2016.
- [53] Formlabs. <http://formlabs.com/support/printers/form-1/issues-while-printing/>. Consultado em Set 2016.
- [54] Formlabs. <http://formlabs.com/support/printers/form-1/print-defects/>. Consultado em Set 2016.
- [55] Ultimaker. <https://ultimaker.com/en/products/materials/pla>. Consultado em Set 2016.
- [56] Ultimaker. [https://ultimaker.tr3sdland.com/pt-br/produto/ultimaker-2-2/?gclid=CjwKEAjwtgo6\\_BRC32q6\\_5s2R-R8SJAB7hTG-VNQfZZwDYaNvR9cJPYvth\\_E0wOZZpWOf3FmNhQcJPBoCVwfw\\_wcB](https://ultimaker.tr3sdland.com/pt-br/produto/ultimaker-2-2/?gclid=CjwKEAjwtgo6_BRC32q6_5s2R-R8SJAB7hTG-VNQfZZwDYaNvR9cJPYvth_E0wOZZpWOf3FmNhQcJPBoCVwfw_wcB). Consultado em Set 2016.
- [57] Formlab. <http://formlabs.com/support/faq/#Form-1-plus>. Consultado em Set 2016.
- [58] Portfólio – Acabamento/ Pós Processamento de peças impressas em impressoras 3D. <http://www.impressao3dfacil.com.br/acabamento-pos-processamento-de-pecas-impressas-em-3d/>. Consultado em Set 2016.
- [59] 10 dicas para um bom acabamento em uma peça feita por impressão 3D. <http://www.3dprinting.com.br/dicas-e-tutoriais/10-dicas-para-um-bom-acabamento-em-uma-peca-de-impressao-3d/>. Consultado em Set 2016.